

Universitat de Lleida

Escola Politècnica Superior

Màster en Enginyeria Industrial

Treball final de Màster

# **Caracterització hidràulica i energètica de dues bombes helicoïdals i una comporta antiretorn**

Autor: Rubén García Ortiz

Directors: Joaquim Monserrat Viscarri i Javier Barragán Fernández

Abril de 2013

## **NOTA PER AL LECTOR:**

**En aquest document apareixen imatges i esquemes que pertanyen a dispositius patentats, qualsevol reproducció i/o còpia per a fins industrials, sense autorització del titular de la patent, estarà infringint la llei 11/86 de 20 de març, de patents d'invenció i models d'utilitat.**

# 0.- ÍNDEX GENERAL

## **Índex general**

<b>0.- ÍNDEX GENERAL .....</b>	<b>1</b>
Índex general .....	2
Índex de taules .....	4
Índex d'imatges .....	7
<b>1.- MEMÒRIA .....</b>	<b>13</b>
Full d'identificació.....	14
Índex de la memòria.....	15
<b>1.1.- Nomenclatura .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.- Agraïments .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3.- Dispositius a estudiar .....</b>	<b>23</b>
<b>1.4.- Objectius .....</b>	<b>25</b>
<b>1.5.- Bombes helicoïdals .....</b>	<b>25</b>
1.5.1.- Descripció de les bombes .....	25
1.5.2.- Antecedents .....	31
1.5.3.- Metodologia .....	50
1.5.4.- Resultats .....	65
1.5.5.- Modelització .....	71
1.5.6.- Propostes de millora.....	86
<b>1.6.- Comportes antiretorn .....</b>	<b>92</b>
1.6.1.- Descripció de les comportes .....	92
1.6.2.- Metodologia .....	98
1.6.3.- Resultats de l'adquisició de dades. ....	100
1.6.4.- Modelització .....	104
<b>1.7.- Bibliografia .....</b>	<b>108</b>
<b>2.- ANNEXES .....</b>	<b>109</b>
Índex dels annexes.....	110
<b>2.1.- Annex 1: característiques en la mesura de cabal mitjançant el ADCP .....</b>	<b>111</b>

2.1.1.- Anàlisi de la velocitat del flux mitjançant el ADCP .....	111
2.1.2.- Dades perdudes durant un transsecte .....	113
2.1.3.- Anàlisi de la descàrrega del flux mitjançant el ADCP .....	114
2.1.4.- Fiabilitat de les dades obtingudes amb el ADCP .....	116
<b>2.2.- Annex 2: mètode gràfic per trobar el volum unitari entre els filets d'una bomba helicoïdal .....</b>	<b>118</b>
<b>2.3.- Annex 3: bomba cònica .....</b>	<b>124</b>
2.3.1.- Dades adquirides .....	124
2.3.2.- Resultats del càlcul del volum unitari d'aigua entre dos filets.....	129
<b>2.4.- Annex 4: bomba cilíndrica de nivell variable.....</b>	<b>136</b>
2.4.1.- Dades adquirides .....	136
2.4.2.- Resultats del càlcul del volum unitari d'aigua entre dos filets.....	140
<b>2.5.- Annex 5: bomba cilíndrica fixa.....</b>	<b>143</b>
2.5.1.- Dades adquirides .....	143
2.5.2.- Resultats del càlcul del volum unitari d'aigua entre dos filets.....	148
<b>2.6.- Annex 6: càlcul de les forces que actuen sobre la comporta antiretorn de pas total</b>	<b>150</b>



## Índex de taules

### 1. Taules de la memòria

Taula 1. 1: altres dades de la bomba cilíndrica fixa. ....	27
Taula 1. 2: altres dades de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	29
Taula 1. 3: altres dades de la bomba cònica. ....	30
Taula 1. 4: relació de pas del cargol i el diàmetre exterior segons la inclinació del cargol. ....	41
Taula 1. 5: resum de les dades adquirides de la bomba cònica. ....	66
Taula 1. 6: resum de les dades adquirides de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	67
Taula 1. 7: resum de les dades adquirides de la bomba cilíndrica fixa. ....	69
Taula 1. 8: índex energètic per cada tipus de bomba. ....	70
Taula 1. 9: dades de partida de la bomba cilíndrica fixa. ....	72
Taula 1. 10: dades de partida de la bomba de cargol cilíndrica de nivell variable. ....	75
Taula 1. 11: resum de velocitat de gir per cadascuna de les marxes de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	76
Taula 1. 12: volum unitaris per cada marxa de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	76
Taula 1. 13: volum per cicle per cada marxa de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	76
Taula 1. 14: cabal teòric per cada marxa de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	77
Taula 1. 15: cabal nominal teòric restant les pèrdues de cabal per fuites de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	78
Taula 1. 16: rendiment volumètric de la bomba cilíndrica de nivell variable per cadascuna de les marxes disponibles. ....	78
Taula 1. 17: dades de partida de la bomba de cargol cònica. ....	79
Taula 1. 18: relació de radis en l'entrada i la sortida de la bomba cònica. ....	80
Taula 1. 19: relació de pas en l'entrada i la sortida de la bomba cònica. ....	80
Taula 1. 20: velocitats màxima i mínima de la bomba cònica. ....	80
Taula 1. 21: resum del cabal teòric calculat per la bomba cònica segons la velocitat de rotació de l'eix ( <i>per a veure els cabals dels altres punts mesurats veure annex 3</i> ). ....	84
Taula 1. 22: resultats del càlcul del cabal impulsat per la bomba cònica segons la inclinació de l'eix d'aquesta amb l'horitzontal. ....	85
Taula 1. 23: dada mesurada amb el tub piezomètric per a la comporta antiretorn de pas total pel cabal màxim (és una dada negativa ja que es perd energia potencial en el pas de l'aigua per la comporta). ....	100

Taula 1. 24: distància de la superfície de l'aigua a l'entrada i a la sortida de la comporta antiretorn de pas total respecte el muret del canal. ....	101
Taula 1. 25: balanç d'energia en la comporta antiretorn de pas total.....	102
Taula 1. 26: variació de nivell de la comporta antiretorn de pas total en funció del cabal....	102
Taula 1. 27: dades mesurades amb el mesurador de nivell per a la comporta de clapeta. ....	104
Taula 1. 28: resultat de l'anàlisi estàtic de la comporta antiretorn de pas total. ....	107

## 2. Taules dels annexes

Taula 2. 1: dades adquirides de la bomba cònica pel ADCP. ....	126
Taula 2. 2: dades adquirides de la bomba cònica amb el tub piezomètric i el multímetre.....	127
Taula 2. 3: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cònica per un angle d'inclinació del seu eix de $0^0$ .....	131
Taula 2. 4: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cònica per un angle d'inclinació del seu eix de $5^0$ .....	131
Taula 2. 5: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cònica per un angle d'inclinació del seu eix de $10^0$ .....	132
Taula 2. 6: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cònica per un angle d'inclinació del seu eix de $15^0$ .....	133
Taula 2. 7: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cònica per un angle d'inclinació del seu eix de $20^0$ .....	133
Taula 2. 8: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cònica per un angle d'inclinació del seu eix de $25^0$ .....	134
Taula 2. 9: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cònica per un angle d'inclinació del seu eix de $30^0$ .....	135
Taula 2. 10: dades adquirides de la bomba cilíndrica de nivell variable pel ADCP.....	137
Taula 2. 11: dades adquirides de la bomba cilíndrica de nivell variable amb el tub piezomètric. ....	137
Taula 2. 12: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cilíndrica de nivell variable per un angle d'inclinació del seu eix de $11,67^0$ .....	140
Taula 2. 13: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cilíndrica de nivell variable per un angle d'inclinació del seu eix de $11,06^0$ .....	141
Taula 2. 14: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cilíndrica de nivell variable per un angle d'inclinació del seu eix de $10,59^0$ .....	142
Taula 2. 15: dades adquirides de la bomba cilíndrica fixa pel ADCP. ....	144
Taula 2. 16: dades adquirides de la bomba cilíndrica fixa amb el tub piezomètric i dades elèctriques de la instal·lació. ....	145
Taula 2. 17: resultats de l'aplicació del mètode gràfic a la bomba cilíndrica fixa.....	149

## Índex d'imatges

### 1. Imatges de la memòria

Imatge 1. 1: recorregut des de la instal·lació 1 fins a la instal·lació 2 (Inst. cartogràfic de Catalunya).....	24
Imatge 1. 2: fotografia aèria de les dues ubicacions (Google Maps), en la fotografia de l'esquerra es troba la instal·lació 1 i a la dreta la 2. ....	25
Imatge 1. 3: imatge virtual de la bomba cilíndrica fixa. ....	26
Imatge 1. 4: vista de perfil del conjunt de la bomba cilíndrica fixa on es mostra la secció del jaç de formigó que suporta el cargol, amb les cotes principals del cargol en mil·límetres.....	26
Imatge 1. 5: vista frontal de la bomba cilíndrica fixa, amb les cotes en mil·límetres.....	27
Imatge 1. 6: imatge real de la bomba cilíndrica fixa durant el seu funcionament.....	27
Imatge 1. 8: imatge virtual de la bomba cilíndrica de nivell variable amb un tall del cilindre exterior. ....	28
Imatge 1. 7: imatge real de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	28
Imatge 1. 9: vista de secció en direcció a l'eix de la bomba cilíndrica de nivell variable (a dalt) i vista posterior (a baix) amb les cotes en mil·límetres.....	29
Imatge 1. 10: imatge real de la bomba cònica.....	30
Imatge 1. 11: imatge virtual de la bomba cònica. ....	30
Imatge 1. 12: vista de perfil del conjunt de la bomba cònica on es mostra una secció d'aquesta amb les cotes principals del cargol en mil·límetres. ....	30
Imatge 1. 13: disseny de bomba de cargol realitzat per l'enginyer i arquitecte Romà Vitroviu. ....	31
Imatge 1. 14: cargol d'Arquímedes modern.....	32
Imatge 1. 15: projecció vertical del cargol i representació de la superfície d'aigua en una cambra compresa entre dos filets. ....	33
Imatge 1. 16: representació gràfica dels punts de tall de la superfície de l'aigua entre dos filets d'una bomba cilíndrica.....	36
Imatge 1. 17: divisió dels segments entre els punts de tall de la superfície de l'aigua amb els filets del cargol (mètode gràfic). ....	37
Imatge 1. 18: trasllat d'un punt de tall intermig a la secció circular (mètode gràfic).....	37
Imatge 1. 19: projecció del volum contingut en un cubell (mètode gràfic). ....	38

Imatge 1. 20: (en gris) zones del volum amb una pressió similar a $h \cdot \sin\beta$ i, (en blau) zones del volum amb pressions de 0 a $h \cdot \sin\beta$ .	40
Imatge 1. 21: gràfica de la màxima altura assolible pel cargol segons el seu angle d'inclinació.	42
Imatge 1. 22: gràfica del cabal màxim assolible pel cargol segons el seu angle d'inclinació.	43
Imatge 1. 23: velocitat màxima de gir d'un cargol d'Arquímedes en relació amb el seu diàmetre exterior.	44
Imatge 1. 24: profunditat d'immersió per a un òptim funcionament del cargol d'Arquímedes.	45
Imatge 1. 25: gràfic que relaciona la profunditat de la part inferior del cargol amb la descàrrega.	46
Imatge 1. 26: diagrama de flux de potència d'una bomba cilíndrica fixa.	48
Imatge 1. 27: gràfic cabal-rendiment global d'una bomba cilíndrica fixa tipus CA de l'empresa COUTEX segons l'altura d'aigua a l'entrada.	50
Imatge 1. 28: cubell tub piezomètric	52
Imatge 1. 29: muntatge tub piezomètric.	52
Imatge 1. 30: mesurador ADCP.	53
Imatge 1. 31: mesurador de nivell d'aigua.	53
Imatge 1. 32: multímetre digital.	53
Imatge 1. 33: esquema muntatge del tub piezomètric en la bomba cònica.	54
Imatge 1. 34: esquema muntatge del tub piezomètric en la bomba cilíndrica de nivell variable.	55
Imatge 1. 35: esquema de la presa de mesures de la bomba cilíndrica de nivell variable.	56
Imatge 1. 36: mesura de nivell d'aigua en dipòsits.	57
Imatge 1. 37: esquema procediment lectura columna d'aigua	58
Imatge 1. 38: connexió Bluetooth del vaixell ADCP.	58
Imatge 1. 39: PDA per a connexió amb ADCP.	58
Imatge 1. 40: (de esquerra a dreta) finestra de configuració de paràmetres de mesura, finestra presa de dades en temps real i finestra d'auto test.	59
Imatge 1. 41: gràfic de perfil de velocitats del programa WinRiver (RD Instruments).	59
Imatge 1. 42: velocitat de la sonda-flotador respecte l'aigua.	60
Imatge 1. 43: batimetria del StreamPro.	61
Imatge 1. 44: trajectòria transsecte.	62

Imatge 1. 45: independència de la trajectòria realitzada pel ADCP per tal de calcular la descàrrega.....	63
Imatge 1. 46: regions estimades i no mesurades pel ADCP.....	63
Imatge 1. 47: menú navegació WinRiver II .....	64
Imatge 1. 48: zona de la corba de rendiment del motor en la que esta treballant la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	68
Imatge 1. 49: maqueta construïda per a fer proves d'omplert i descàrrega. ....	71
Imatge 1. 50: gràfic comparatiu entre el cabal real i el teòric de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	78
Imatge 1. 51: configuració bomba cònica amb flotador ( <i>nivell d'entrada fix a 20 cm de l'eix</i> ). .....	81
Imatge 1. 52: gir positiu i negatiu de la bomba cònica amb flotador.....	81
Imatge 1. 53: evacuació d'aigua de la bomba cònica sense necessitat d'estar en funcionament. .....	82
Imatge 1. 54: evacuació d'aigua de la bomba cònica a mesura que augmenta el nivell d'aigua a l'entrada (l'angle beta es fa negatiu).....	82
Imatge 1. 55: limitació del volum elevat per la bomba cònica en funció de la seva inclinació. .....	83
Imatge 1. 56: gràfic comparatiu entre el cabal real i el teòric de la bomba cilíndrica de nivell variable. ....	84
Imatge 1. 57: evolució del cabal impulsat per la bomba cònica en funció de la inclinació i de la velocitat de gir de l'eix.....	85
Imatge 1. 58: evolució del cabal impulsat per la bomba cònica en funció de la inclinació amb una velocitat de gir fixa de 20 rpm.....	86
Imatge 1. 59: gràfiques de potència elèctrica i inclinació de l'eix de la bomba en funció del cabal impulsat.....	89
Imatge 1. 60: gràfica del consum elèctric de la bomba cilíndrica fixa vers la bomba cilíndrica de nivell variable en funció del desnivell.....	90
Imatge 1. 61: limitador de parell. ....	91
Imatge 1. 62: imatge virtual de la comporta de clapeta. ....	93
Imatge 1. 63: vista frontal de la comporta de clapeta (cotes en mil·límetres). ....	93
Imatge 1. 64: imatge real de la comporta de clapeta. ....	93
Imatge 1. 65: caixa comporta antiretorn de pas total. ....	94
Imatge 1. 66: coixinet de niló per a l'eix de la comporta antiretorn de pas total.....	94

Imatge 1. 67: junta de goma perimetral.....	95
Imatge 1. 68: vista frontal i de planta de la comporta antiretorn de pas total, amb les cotes en mil·límetres. ....	95
Imatge 1. 69: imatge virtual de la comporta antiretorn de pas total. ....	96
Imatge 1. 70: (de esquerra a dreta) comporta de clapeta i comporta antiretorn de pas total... ..	98
Imatge 1. 71: esquema de muntatge del tub piezomètric en la comporta antiretorn de pas total. ....	99
Imatge 1. 72: esquema de la presa de mesures de la comporta de clapeta. ....	100
Imatge 1. 73: càlcul de la secció mullada a l'entrada i a la sortida de la comporta antiretorn de pas total (cotes en mil·límetres). ....	101
Imatge 1. 74: moviment d'inclinació de la comporta.....	102
Imatge 1. 75: gràfica d'inclinació de la comporta en funció de la velocitat. ....	103
Imatge 1. 76: volum de control considerat per a l'estudi de forces que actuen en la comporta antiretorn de pas total. ....	105
Imatge 1. 77: esquema de les forces que actuen sobre la comporta antiretorn de pas total... ..	105

## 2. Imatges dels annexes

Imatge 2. 1: perfil de velocitats enregistrat per l'ADCP en el tercer assemblatge (arxiu comp.1002r.00). .....	111
Imatge 2. 2: tabulació de la velocitat de les diferents cel·les en el tercer assemblatge (arxiu comp.1002r.00). .....	112
Imatge 2. 3: traçat de la direcció del vector velocitat mitjana del flux respecte la direcció del ADCP en els assemblatges 3 i 4 (arxiu comp.1002r.00). .....	113
Imatge 2. 4: decorrelació en una batimetria. ....	114
Imatge 2. 5: flotador i vectors de velocitat. ....	116
Imatge 2. 6: sectors d'una batimetria no llegits (decorrelació). .....	116
Imatge 2. 7: comptador de lectures errònies del software WinRiver. ....	117
Imatge 2. 8: pantalla de recol·lecció de dades del software StreamPro. ....	117
Imatge 2. 9: projecció de la secció d'una bomba cilíndrica fixa de tres començaments. ....	118
Imatge 2. 10: projecció dels punts de tall de la làmina lliure d'aigua en la secció realitzada en un plànol perpendicular a l'eix del cargol. ....	119
Imatge 2. 11: projecció d'un dels punts de tall intermedis de la làmina lliure d'aigua en la secció realitzada en un plànol perpendicular a l'eix del cargol. ....	119
Imatge 2. 12: projecció del volum d'aigua contingut en una cambra d'un cargol d'Arquímedes de tres filets i un pas equivalent al diàmetre exterior. ....	120
Imatge 2. 13: divisió de la secció del cargol per l'anàlisi del volum corresponent al volum d'aigua que no té contacte total amb els filets. ....	120
Imatge 2. 14: dimensions considerades pel càlcul dels volums unitaris d'aigua de les zones sense contacte total entre filets. ....	121
Imatge 2. 15: perfil triangular considerat per cada porció analitzada del volum d'aigua unitari. ....	122
Imatge 2. 16: secció trapezoïdal del canal per defecte en la configuració del ADCP. ....	124
Imatge 2. 17: secció circular del canal on es trobava la bomba cònica. ....	124
Imatge 2. 18: secció humida a la sortida de la bomba cònica (la línia blava és l'altura de l'aigua a la sortida de la bomba). ....	127
Imatge 2. 19: espiral d'Arquímedes. ....	129
Imatge 2. 20: secció de la bomba cònica per al primer pas. ....	130
Imatge 2. 21: projecció del volum d'aigua contingut en el primer pas de la bomba cònica per una inclinació del seu eix de $0^0$ . ....	130



Imatge 2. 22: projecció del volum d'aigua contingut en el primer pas de la bomba cònica per una inclinació del seu eix de $5^0$ .....	131
Imatge 2. 23: projecció del volum d'aigua contingut en el primer pas de la bomba cònica per una inclinació del seu eix de $10^0$ .....	132
Imatge 2. 24: projecció del volum d'aigua contingut en el primer pas de la bomba cònica per una inclinació del seu eix de $15^0$ .....	132
Imatge 2. 25: projecció del volum d'aigua contingut en el primer pas de la bomba cònica per una inclinació del seu eix de $20^0$ .....	133
Imatge 2. 26: projecció del volum d'aigua contingut en el primer pas de la bomba cònica per una inclinació del seu eix de $25^0$ .....	134
Imatge 2. 27: projecció del volum d'aigua contingut en el primer pas de la bomba cònica per una inclinació del seu eix de $30^0$ .....	134
Imatge 2. 28: gràfic d'intensitat, rendiment, FP i velocitat de gir del motor de la bomba cilíndrica de nivell variable, en funció de la càrrega que se li aplica al motor. ....	138
Imatge 2. 29: variació de la inclinació de la bomba cilíndrica de nivell variable en funció del règim de voltes del cargol. ....	139
Imatge 2. 30: projecció del volum d'aigua contingut en cada cambra de la bomba cilíndrica de nivell variable per una inclinació del seu eix de $11,67^0$ .....	140
Imatge 2. 31: projecció del volum d'aigua contingut en cada cambra de la bomba cilíndrica de nivell variable per una inclinació del seu eix de $11,06^0$ .....	141
Imatge 2. 32: projecció del volum d'aigua contingut en cada cambra de la bomba cilíndrica de nivell variable per una inclinació del seu eix de $10,59^0$ .....	141
Imatge 2. 33: obertura de sortida de la bomba cilíndrica fixa.....	145
Imatge 2. 34: doll del vessador i sense contraccions.....	146
Imatge 2. 35: amplada del vessador de sortida de la bomba cilíndrica fixa.....	147
Imatge 2. 36: projecció del volum d'aigua contingut en cada cambra de la bomba cilíndrica fixa.....	149
Imatge 2. 37: vista de perfil de la comporta antiretorn de pas total. ....	150
Imatge 2. 38: forces de pressió sobre el volum de control considerat. ....	151
Imatge 2. 39: DSLI comporta antiretorn de pas total.....	153

# 1.- MEMÒRIA

## **Full d'identificació**

### **Dades del projecte:**

Títol: Caracterització hidràulica i energètica de dues bombes helicoïdals i una comporta antiretorn.

Ubicació: Campus de Cappont, carrer Pere Cabrera s/n, Lleida.

### **Dades del promotor:**

Nom i cognoms: Universitat de Lleida

NIF: Q7550001G

Direcció postal: Victor Siurana 1, 25003 – Lleida

Telèfon: 973702000

### **Dades del projectista:**

Nom i cognoms: Rubén García Ortiz

NIF.: 47694791-J

Direcció postal: C/ Alfons II, 14 BIS, 4<sup>a</sup>1<sup>a</sup>, 25001– Lleida

Telèfon: 973200843

# Índex de la memòria

<b>Full d'identificació.....</b>	<b>14</b>
<b>Índex de la memòria.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.- Nomenclatura .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.- Agraïments .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3.- Dispositius a estudiar.....</b>	<b>23</b>
<b>1.4.- Objectius .....</b>	<b>25</b>
<b>1.5.- Bombes helicoïdals.....</b>	<b>25</b>
1.5.1.- Descripció de les bombes.....	25
1.5.1.1.- Bomba cilíndrica fixa .....	26
1.5.1.2.- Bomba cilíndrica de nivell de variable (B&G) .....	28
1.5.1.3.- Bomba cònica (B&G) .....	29
1.5.2.- Antecedents .....	31
1.5.2.1.- Determinació de la descàrrega.....	35
1.5.2.2.- Pèrdues per fuites .....	40
1.5.2.3.- Rati de radis.....	41
1.5.2.4.- Relació entre el pas del cargol i el diàmetre exterior.....	41
1.5.2.5.- Número de començaments o filets de la bomba de cargol .....	41
1.5.2.6.- Angle d'inclinació del cargol amb l'horitzontal .....	42
1.5.2.7.- Selecció de la velocitat .....	43
1.5.2.8.- Efecte de la profunditat d'immersió i el tancat total del cargol. ....	44
1.5.2.9.- Pèrdues i diagrama de flux de potència .....	46
1.5.3.- Metodologia .....	50
1.5.3.1.- Descripció de les dades adquirides .....	51
1.5.3.2.- Descripció dels punts de mesura.....	54
1.5.3.3.- Tractament de les dades .....	57
1.5.4.- Resultats .....	65
1.5.4.1.- Anàlisi de les dades adquirides .....	65
1.5.4.2.- Índex energètic.....	70
1.5.5.- Modelització .....	71
1.5.5.1.- Comprovació d'una bomba cilíndrica totalment encapsulada .....	71
1.5.5.2.- Anàlisi del comportament hidràulic teòric de les bombes.....	72

1.5.6.-	Propostes de millora.....	86
1.5.6.1.-	Redimensionament del motor elèctric.....	87
1.5.6.2.-	Eliminar la part superior del cilindre exterior .....	90
1.5.6.3.-	Limitador de parell .....	91
<b>1.6.-</b>	<b>Comportes antiretorn .....</b>	<b>92</b>
1.6.1.-	Descripció de les comportes .....	92
1.6.1.1.-	Comporta de clapeta .....	92
1.6.1.2.-	Comporta antiretorn de pas total .....	94
1.6.2.-	Metodologia .....	98
1.6.2.1.-	<b>Descripció de les dades adquirides .....</b>	<b>98</b>
1.6.2.2.-	<b>Descripció dels punts de mesura.....</b>	<b>98</b>
1.6.3.-	Resultats de l'adquisició de dades. ....	100
1.6.4.-	Modelització .....	104
<b>1.7.-</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>108</b>

## 1.1.- Nomenclatura

- Definicions de les abreviacions utilitzades pel càlcul del cabal descarregat per una bomba de cargol

Abreviació	Unitats	Descripció
$Q$	$m^3/s$	Cabal descarregat per una bomba de cargol.
$n$	$rpm$	Velocitat de gir del cargol.
$D$	$m$	Diàmetre exterior dels filets d'una bomba de cargol.
$k$	Adim.	Coefficient adimensional extret de l'anàlisi gràfic de la descàrrega del cargol per unes característiques constructives i geomètriques específiques.

- Definició de les abreviacions que apareixen en els apartats de resultats de l'adquisició dades

Abreviació	Unitats	Descripció
$Q$	$m^3/s$	Cabal que circula pel canal mesurat pel mesurador de cabal per efecte Doppler (ADCP).
$S_C$	$m^2$	Porció de la riba de la secció real del canal en la que es van realitzar les mesures de cabal amb el ADCP.
$S_E$	$m^2$	Secció mullada a l'entrada del dispositiu analitzat.
$S_S$	$m^2$	Secció mullada a la sortida del dispositiu analitzat.
$Q_E$	$m^3/s$	Cabal que circula per la riba esquerra del canal mesurat amb el ADCP.
$Q_D$	$m^3/s$	Cabal que circula per la riba dreta del canal mesurat amb el ADCP.
$v$	$m/s$	Velocitat mitja del flux en el canal mesurada amb el ADCP.

<i>Abreviació</i>	<i>Unitats</i>	<i>Descripció</i>
$v_E$	$m/s$	Velocitat mitja del flux en la riba esquerra del canal mesurada amb el ADCP.
$v_D$	$m/s$	Velocitat mitja del flux en la riba dreta del canal mesurada amb el ADCP.
$v_{ent}$	$m/s$	Velocitat d'entrada del flux al dispositiu analitzat.
$v_{sort}$	$m/s$	Velocitat de sortida del flux del dispositiu analitzat.
$N_a$	Adim.	Número d'assemblatges realitzats en la mesura amb el ADCP.
$C_d$	%	Número de cel·les dolentes.
$D_E$	$m$	Distància del límit de mesura del ADCP fins a la riba esquerra del canal.
$D_D$	$m$	Distància del límit de mesura del ADCP fins a la riba dreta del canal.
$P_E$	$m$	Profunditat en el punt del límit de mesura del ADCP en la riba esquerra.
$P_D$	$m$	Profunditat en el punt del límit de mesura del ADCP en la riba dreta.
$Q_C$	$m^3/s$	Cabal corregit que hi circula pel canal en cadascuna de les mesures realitzades.
$\overline{Q_C}$	$m^3/s$	Cabal corregit mig de mesures preses en condicions similars.
$E_Q$	%	Error de la mesura de cabal realitzada amb el ADCP respecte el cabal corregit mig.
$\Delta h$	$m$	Variació del nivell d'aigua entre l'entrada i la sortida del dispositiu estudiat.
$I$	$A$	Intensitat que circula per circuit elèctric que alimenta el motor de la bomba.

<i>Abreviació</i>	<i>Unitats</i>	<i>Descripció</i>
$V$	$V$	Voltatge d'alimentació al motor de la bomba.
$H$	$m$	Energia total comunicada al fluid.
$P_H$	$W$	Potència hidràulica comunicada a l'aigua.
$P_{\text{elect}}$	$W$	Potència elèctrica consumida pel motor de la bomba.
$P_{\text{mec.útil}}$	$W$	Potència mecànica útil del motor de la bomba.
$C$	$\%$	Càrrega parcial desenvolupada pel motor de la bomba.

- **Definició de les abreviacions que apareixen en l'apartat de modelització de les bombes helicoidals**

<i>Abreviació</i>	<i>Unitats</i>	<i>Descripció</i>
$\sigma$	Adim.	Relació entre el pas i el diàmetre extern del filet.
$S$	$m$	Pas dels filets del cargol.
$D$	$m$	Diàmetre dels filets del cargol.
$d$	$m$	Diàmetre de l'eix del cargol.
$R$	$m$	Radi dels filets del cargol.
$r$	$m$	Radi de l'eix del cargol.
$\delta$	Adim.	Relació entre el diàmetre/radi exterior dels filets i el diàmetre/radi de l'eix del cargol.
$\beta$	$^{\circ}$	Inclinació del cargol.
$V_U$	$m^3$	Volum unitari d'aigua present entre dos filets d'un cargol.
$V_C$	$m^3$	Volum descarregat pel cargol per cada volta realitzada.
$a$	Adim.	Número de començaments (filets) del cargol.
$h$	$m$	Espai lliure entre dos filets adjacents.



<i>Abreviació</i>	<i>Unitats</i>	<i>Descripció</i>
$Q_n$	$m^3/s$	Cabal teòric descarregat pel cargol sense contar les pèrdues volumètriques.
$Q_1$	$m^3/s$	Cabal teòric perdut en la folgança entre els filets i el cilindre exterior
$n$	$rpm$	Velocitat de gir del cargol.
$A$	Adim.	Coeficient de correcció del valor del cabal teòric $Q_n$ .
$k$	Adim.	Coeficient adimensional extret de l'anàlisi gràfic de la descàrrega del cargol per unes característiques constructives i geomètriques específiques.
$S_{SP}$	$mm$	Espai lliure o folgança entre el cilindre exterior del cargol i l'extrem del filet.
$\eta_v$	%	Rendiment volumètric de la bomba.
$\eta_g$	%	Rendiment global de la bomba.
$\eta_m$	%	Rendiment del motor elèctric de la bomba.

- **Definició de les abreviacions que apareixen en l'apartat de modelització de la comporta antiretorn de pas total**

<i>Abreviació</i>	<i>Unitats</i>	<i>Descripció</i>
$\alpha$	°	És l'angle d'inclinació entre la superfície inferior de la comporta i el pla horitzontal.
$S_{in}$	$m^2$	És la secció d'entrada al volum de control. L'altura de la qual depèn de $y_{in}$ .
$S_{out}$	$m^2$	És la secció d'entrada al volum de control. L'altura de la qual depèn de $y_{out}$ .
$V_{ext}$	$m^3$	És el volum d'aigua que es troba per damunt del volum de control.
$P_{aigua}$	N	És el pes d'aigua que es troba per damunt del volum de control.
$F_{in}$	N	És la força que exerceix la pressió d'aigua en $S_{in}$ .

<i>Abreviació</i>	<i>Unitats</i>	<i>Descripció</i>
$F_{out}$	N	És la força que exerceix la pressió d'aigua en $S_{out}$ .
$k_x$	N	Component horitzontal de la força que exerceix l'aigua sobre el cos de la comporta.
$k_y$	N	Component vertical de la força que exerceix l'aigua sobre el cos de la comporta.
$N_X$	N	Component horitzontal de la força realitzada per l'eix de la comporta.
$N_y$	N	Component vertical de la força realitzada per l'eix de la comporta.
$l_{k_x}$	$m$	Distància perpendicular a la component horitzontal $k_x$ .
$l_{k_y}$	$m$	Distància perpendicular a la component vertical $k_y$ .
$l_p$	$m$	Distància perpendicular al vector del pes de l'aigua del V.C.
$l_{p_{aigua}}$	$m$	Distància perpendicular al vector del pes de l'aigua que es troba per damunt del V.C.
$l_{F_{flotació}}$	$m$	Distància perpendicular al vector de la força de flotació.
$q_{in}$	$m/s$	Velocitat del flux a l'entrada de la comporta de pas total.
$q_{out}$	$m/s$	Velocitat del flux a la sortida de la comporta de pas total.

## 1.2.- **Agraïments**

L'autor d'aquest projecte agraeix l'ajuda rebuda per part de:

- Joaquim Monserrat i Javier Barragán, directors del treball.
- Víctor Buera
- Lluís Cots.
- Josep Rius.
- Josep Ribó.
- I molt especialment a Eva Mireya Prieto, M<sup>a</sup> José Ortiz, Antonio García i Cristian García, la meva família.

### 1.3.- Dispositius a estudiar

Els dispositius objectes d'aquest estudi són una comporta antiretorn de pas total (marca: B&G Buera S.L.), un prototipus de bomba cònica (marca: B&G Buera S.L.), una bomba cilíndrica fixa i un prototipus de bomba cilíndrica de nivell variable (marca: B&G Buera S.L.). Aquests es troben ubicats prop de la desembocadura del riu Ebre, en la província de Tarragona, entre les comarques del Baix Ebre i del Montsià, en la part més meridional de Catalunya.

Es tracta d'un entorn agrícola, dedicat a la producció d'arròs, fet que implica la necessitat d'una aportació continua d'aigua per al cultiu d'aquest cereal i, per tant, una evacuació d'aquesta.

Per tal de conduir aquest aigua fins al mar, hi ha una sèrie de canals on desaigüen totes les parcel·les de la zona i que, per tant, no tant sols porten aigua, si no que a més incorporen restes orgàniques provinents de l'activitat agrícola.

Així doncs, es tracta d'una activitat que precisa d'aigua dolça per al seu correcte desenvolupament i que, per tant, es necessari evitar una contaminació hídrica per part de l'aigua del mar, la qual es pot donar en el desguàs d'aquests canals al mar. Per tal d'evitar aquest fet, s'instal·len comportes antiretorn a la zona de desembocadura, que separen la zona d'aigua salina i la d'aigua dolça.

Els quatre dispositius es troben en dues ubicacions diferents, els dos primers, la comporta antiretorn de pas total i la bomba cònica es troben en una parcel·la declarada d'interès mediambiental per a les aus de la zona (**instal·lació 1**), a la banda est de l'Encanyissada. Aquest dos dispositius tenen la funció d'evacuar l'aigua acumulada d'aquesta parcel·la cap als canals de drenatge general. La bomba cilíndrica fixa i la bomba cilíndrica de nivell variable estan situades en la Sèquia de l'Ala (**instal·lació 2**), la qual és una estació de bombament. Aquestes dues bombes descarreguen el cabal d'aigua que arriba a l'estació de bombament, en la Boca de la Llanada. Aquesta zona marítima es troba entre la línia de costa que va de San Carles de la Ràpita fins a la Punta de la Banya. La distància entre aquestes dues ubicacions és relativament petita, tal i com es pot comprovar en la **imatge 1.1**. La població més propera a la ubicació on es troben els dispositius és Poblenou del Delta, a una distància de 2 i 2,8 Km de la instal·lació 1 i la 2 respectivament.

En el cas de la comporta antiretorn de pas total, es tracta d'un mecanisme que només permet la circulació de l'aigua en un sol sentit. Aquest a diferència de les comportes de clapeta, no permet cap tipus de filtració, ja que disposa d'un tancat perimetral fet mitjançant un làmina de neoprè reforçada interiorment per un revestiment metàl·lic flexible que permet que la comporta pugui pivotar en tot el seu recorregut sense cap tipus d'impediment. Per tal de que aquesta tingui una ràpida reacció a les variacions entre el nivell d'entrada i el de sortida, disposa d'un flotador en la part frontal de la mateixa, construït mitjançant un tancat hermètic amb el mateix material amb el que s'ha fet el cos de la comporta i formant tot un conjunt amb la mateixa. Aquest flotador exerceix el parell necessari sobre l'eix pivotant quan el nivell de la sortida és lleugerament superior al de l'entrada, per evitar el pas d'aigua.



Imatge 1. 1: recorregut des de la instal·lació 1 fins a la instal·lació 2 (Inst. cartogràfic de Catalunya).

La bomba cilíndrica fixa és una bomba ideada per a grans cabals i baixes altures, de secció constant, que funciona mitjançant el desplaçament positiu del fluid en direcció paral·lela a l'eix de rotació del mateix. S'ha analitzat per poder-la comparar amb les altres bombes.

D'altra banda, la bomba cilíndrica de nivell variable, d'igual forma que en el cas anterior, es tracta d'una màquina hidràulica per l'elevació de grans cabals d'aigua a baixes altures, de secció constant, que té el mateix funcionament que un cargol d'Arquímedes, amb l'afegit en aquest cas, d'una adequació de la inclinació del cargol depenent del nivell d'aigua a la sortida.

La bomba cònica segueix el mateix principi d'un cargol d'Arquímedes, no obstant té una forma geomètrica cònica que li proporciona secció variable. Aquesta mateixa forma, permet que el mecanisme pugui mantenir el seu eix de rotació paral·lel al pla horitzontal, encara que hi ha la possibilitat d'afegir-li un flotador en la boca d'entrada amb un eix pivotant en la boca de sortida, això últim unit a un premarc encastrat al mur del canal de sortida, per tal d'aconseguir que la bomba s'adapti a la variabilitat dels nivells d'aigua a l'entrada de la mateixa.



Imatge 1. 2: fotografia aèria de les dues ubicacions (Google Maps), en la fotografia de l'esquerra es troba la instal·lació 1 i a la dreta la 2.

## 1.4.- Objectius

Els objectius d'aquest document son:

1. Avaluació hidràulica i energètica de les bombes helicoïdals i la comporta antiretorn de pas total.
2. Modelització dels quatre dispositius estudiats.
3. Propostes de millora de les bombes helicoïdals analitzades, orientades a una millora del funcionament i eficiència d'aquestes.

## 1.5.- Bombes helicoïdals

### 1.5.1.- Descripció de les bombes

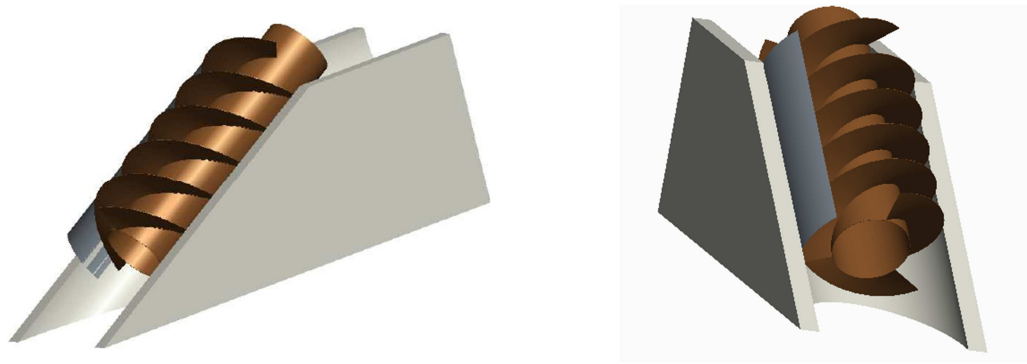
En aquest apartat de la memòria es realitza una descripció tècnica detallada dels tres models de bombes helicoïdals estudiades.



### 1.5.1.1.- Bomba cilíndrica fixa

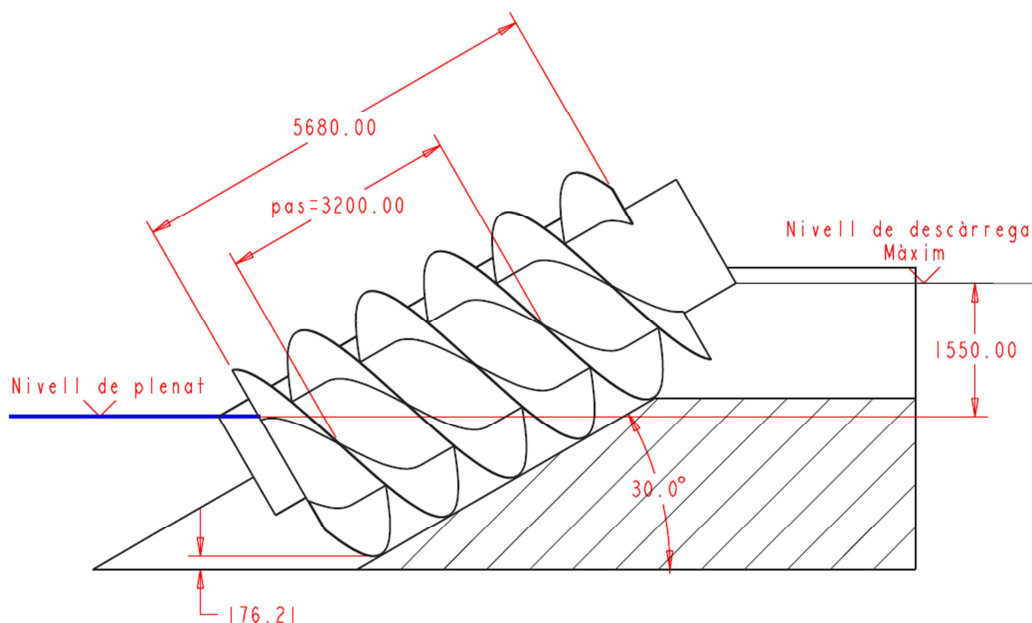
És una bomba de cargol d'Arquímedes per grans cabals i altures reduïdes. Està constituïda per un eix tubular d'acer al carboni, al que se li ha soldat una hèlix amb tres començaments, en xapa d'acer conformada en fred. L'eix tubular està rematat amb dos tapes d'acer en les que hi ha fixades, mitjançant cargols, les brides extremes de suport.

Aquest està muntat sobre un jaç de formigó de secció semicircular que es prolonga en un perfil d'acer fins a cobrir un total de 225°, amb objecte d'evitar que la rotació provoqui un vessament lateral d'aigua. Entre els filets i el jaç de formigó hi ha una distància de 7 mm, amb una tolerància de  $\pm 2$  mm.



Imatge 1. 3: imatge virtual de la bomba cilíndrica fixa.

A continuació es mostra una secció de perfil del jaç de formigó on es recolza el cargol. En aquesta secció es poden veure algunes de les dimensions més importants d'aquest cargol:

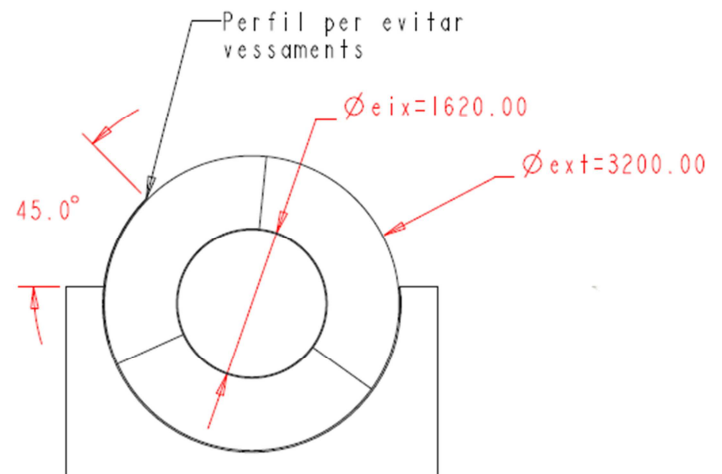


Imatge 1. 4: vista de perfil del conjunt de la bomba cilíndrica fixa on es mostra la secció del jaç de formigó que suporta el cargol, amb les cotes principals del cargol en mil·límetres.

D'altra banda, es mostra una vista frontal de la bomba per tal de poder distingir les dimensions dels diàmetres de l'eix i dels filets del cargol, així com l'angle que forma amb l'horitzontal el perfil per evitar vessaments.

Altres dades importants	
Cabal nominal segons projecte (l/s)	3.750
Velocitat nominal(rpm)	23
Potència elèctrica instal·lada (CV)	150

Taula 1. 1: altres dades de la bomba cilíndrica fixa.



Imatge 1. 5: vista frontal de la bomba cilíndrica fixa, amb les cotes en mil·límetres.

La següent imatge mostra la bomba cilíndrica fixa real funcionant durant l'època de sega dels camps d'arròs de la zona.



Imatge 1. 6: imatge real de la bomba cilíndrica fixa durant el seu funcionament.

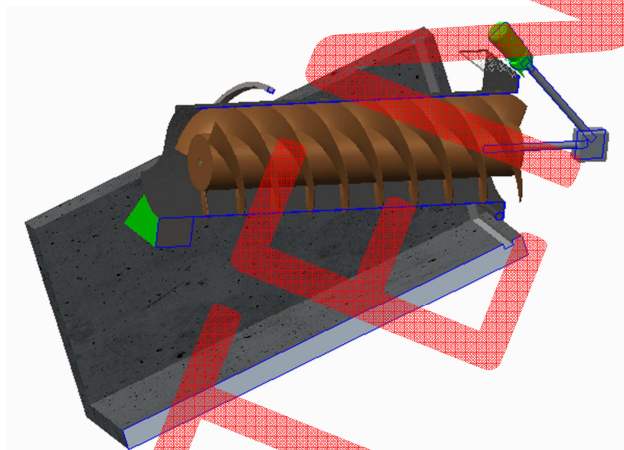


### 1.5.1.2.- Bomba cilíndrica de nivell de variable (B&G)

Es tracta d'un cargol d'Arquímedes que pivota sobre un eix situat a la secció d'entrada. A més, disposa d'un flotador en l'extrem per on descarrega, que li permet adaptar la inclinació del conjunt segons el nivell d'aigua a la sortida, de tal forma que eviti un retrocés d'aigua degut a una pujada del nivell a la sortida. Això fa que no li calgui comporta de clapeta a la sortida.

En aquest cas, també es tracta, d'igual forma que en el cas anterior, d'un cargol format per un eix tubular d'acer al carboni, al que se li ha soldat una hèlix amb tres començaments en xapa d'acer conformada en fred.

No obstant, a més d'incorporar la funció basculant, es tracta d'un cargol d'Arquímedes amb un cilindre exterior que encapsula tot el cos del cargol. A continuació en les **imatges 1.7 i 1.8** es pot comprovar aquest detall constructiu.

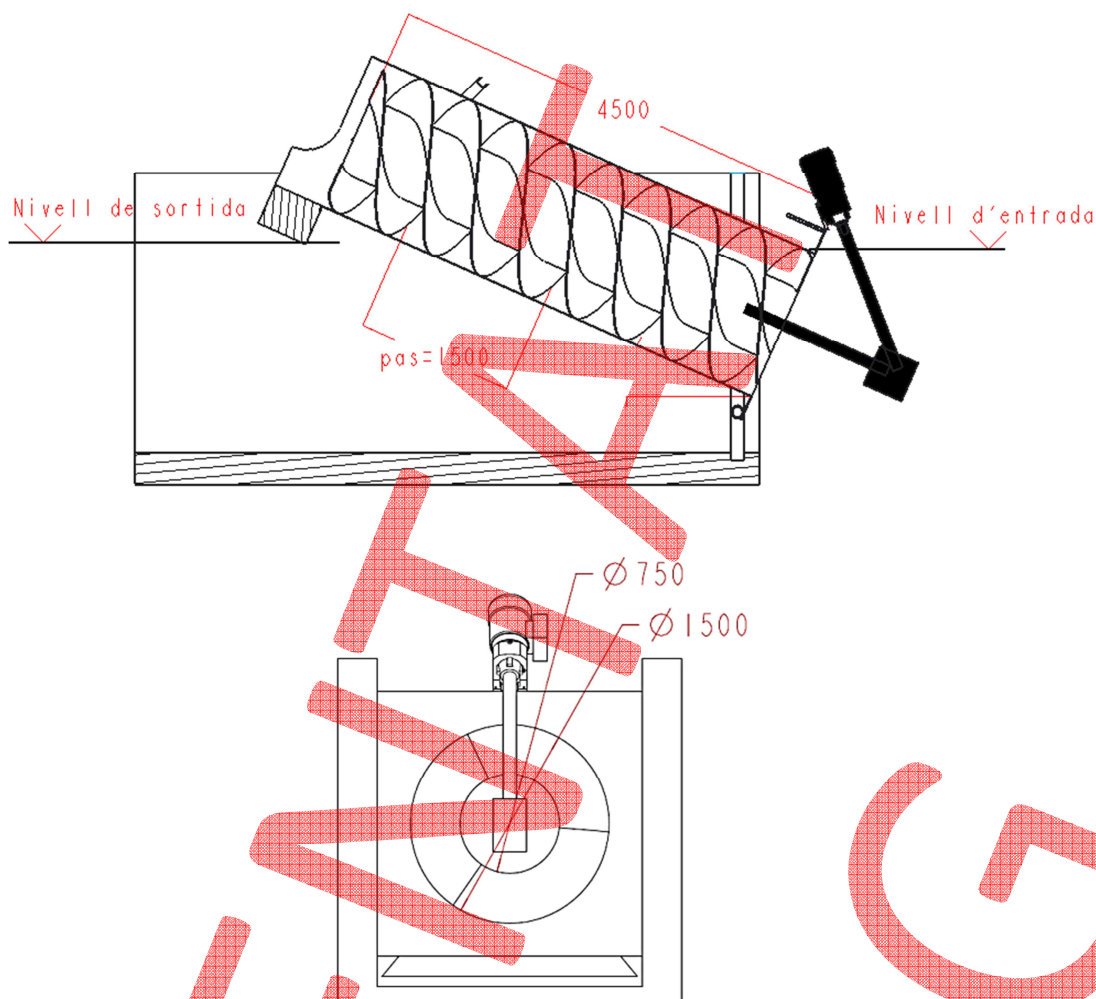


Imatge 1. 7: imatge virtual de la bomba cilíndrica de nivell variable amb un tall del cilindre exterior.



Imatge 1. 8: imatge real de la bomba cilíndrica de nivell variable.

A continuació es mostra una secció en direcció a l'eix del cargol i una vista posterior del mateix.



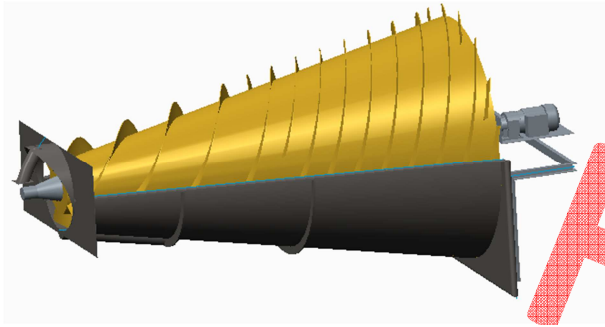
Imatge 1. 9: vista de secció en direcció a l'eix de la bomba cilíndrica de nivell variable (a dalt) i vista posterior (a baix) amb les cotes en mil·límetres.

Altres dades importants	
Fabricant del motor elèctric	Leroy Somer
Tipologia motor	Motor d'inducció
Número de pols del motor	4
Potència nominal del motor (kW)	37
Tensió d'alimentació (V)	400
Mecanisme de transmissió	Caixa reductora
Control de velocitat	Tres mòduls resistors

Taula 1. 2: altres dades de la bomba cilíndrica de nivell variable.

### 1.5.1.3.- Bomba cònica (B&G)

A diferència dels dos models anteriors, aquesta bomba té una secció variable al llarg del seu eix, a més de disposar, de la mateixa forma que en el model de la bomba cilíndrica nivell variable, d'un encapsulat del cargol.



Imatge 1. 10: imatge virtual de la bomba cònica.



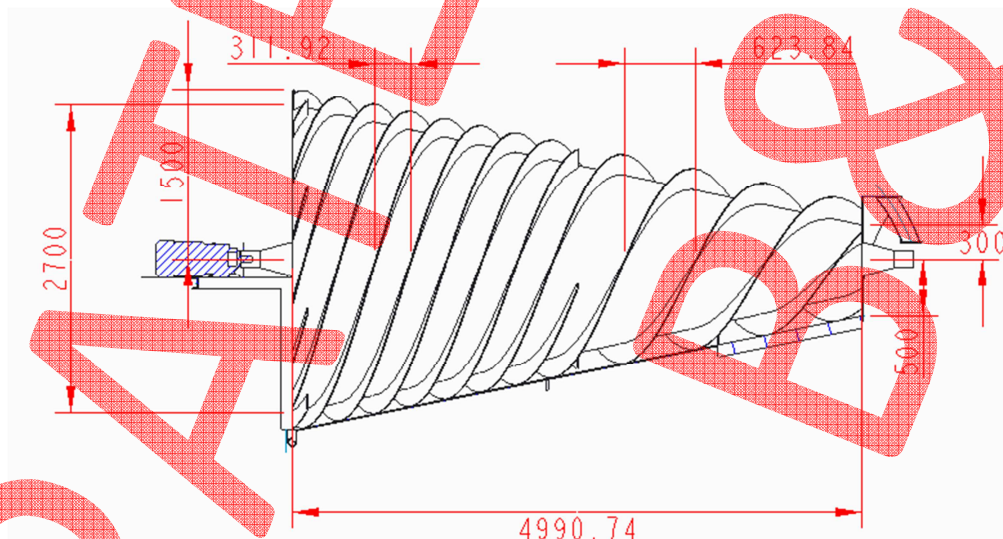
Imatge 1. 11: imatge real de la bomba cònica.

Tal i com es pot observar en la **imatge 1.10**, la bomba disposa d'una comporta antiretorn de pas total a la sortida de la mateixa.

Altres dades importants	
Fabricant del motor elèctric	AEG
Tipologia motor	Motor d'inducció
Número de pols del motor	4
Potència nominal del motor (kW)	15
Tensió d'alimentació (V)	400
Mecanisme de transmissió	Caixa reductora
Control de velocitat	Variador de freqüència

Taula 1. 3: altres dades de la bomba cònica.

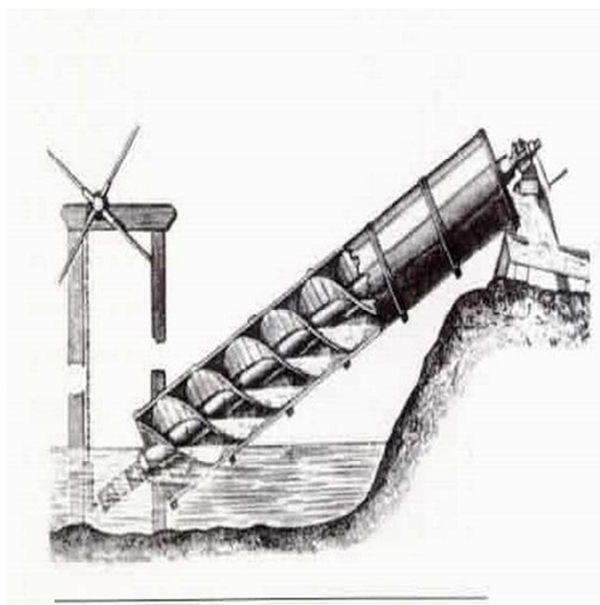
En la següent imatge es mostren les dimensions principals de la bomba cònica, la qual esta composta per 16 filets, dels quals 8 tenen una longitud de 70 cm, uns altres 4 continuen fins a la meitat de la longitud de l'eix i només 4 filets segueixen fins al final del cargol.



Imatge 1. 12: vista de perfil del conjunt de la bomba cònica on es mostra una secció d'aquesta amb les cotes principals del cargol en mil·límetres.

### 1.5.2.- Antecedents

El cargol d'Arquímedes és un dels mecanismes d'elevació d'aigua per al reg i el drenatge més antics que actualment segueixen en ús. Des dels seus inicis va patir algunes modificacions tècniques amb l'objectiu d'elevat la màxima quantitat d'aigua per cada volta que realitzava el cargol. No obstant, el disseny més conegut d'aquest dispositiu, després, evidentment, del d'Arquímedes, va estar el de l'enginyer i arquitecte romà Vitroviu, el qual va donar alguns detalls constructius d'aquest disseny. Aquests procediments es troben detallats en el document *De Architectura* escrit per ell mateix en el primer segle A. de C.



Imatge 1. 13: disseny de bomba de cargol realitzat per l'enginyer i arquitecte Romà Vitroviu.

La conformació del cargol, començava donant-li forma al tronc de un arbre, convertint-lo en un nucli cilíndric (cilindre interior), el qual tenia una longitud de 16 vegades el seu diàmetre. En aquest nucli cilíndric es ficaven vuit filets helicoidals entrellaçats, construïts de vímet, amb una altura d'aquests equivalent al radi del nucli.

El pas entre filets era igual a la circumferència del nucli del cilindre. Finalment, un cilindre exterior fet mitjançant taulons de fusta era unit als filets. Durant l'assemblatge del conjunt, totes les parts eren cobertes de brea a fi efecte de fer el cargol el més estanc possible.

El cargol girava al voltant del seu eix principal i estava inclinat en la direcció de la hipotenusa d'un triangle 3-4-5 (triangle rectangle de Pitàgores).

La part inferior estava immersa en un dipòsit, del qual, mitjançant la rotació del cargol, s'aconseguia pujar l'aigua a un altre dipòsit situat en la part superior del cargol.

La geometria d'un cargol d'Arquímedes modern esta basada en certs paràmetres externs (radi exterior, longitud i pendent) i certs paràmetres interns (radi intern, número de filets, el pas dels filets). Els paràmetres externs estan determinats normalment per la



localització del cargol i la quantitat d'aigua que s'ha d'elevat. Els paràmetres interns, no obstant, són de lliure elecció per tal d'optimitzar els rendiment global del cargol.

En els cargols d'Arquímedes moderns, el cilindre exterior es normalment fixe i els filets estant units al cilindre interior. Aquest detall constructiu, permet que la part superior del cargol sigui eliminada, formant-se, d'altra banda, un canal estacionari en la mitat inferior del cilindre exterior. Aquest nou disseny, permet un fàcil accés a l'interior del mecanisme, a fi d'eliminar residus i d'altra banda, una millora en les rutines de manteniment.

Un altre efecte d'aquest canvi que ha sofert el disseny en aquest últims anys, ha provocat que el conjunt filets-cilindre interior hagi de suportar un pes d'aigua inferior, evitant d'aquesta forma, el patiment per sobrecàrrega dels coixinets i de les transmissions corresponents. Per contra, el desavantatge d'aquest disseny te a veure amb la pèrdua d'aigua en l'espai que queda entre els filets mòbils i el cilindre exterior.



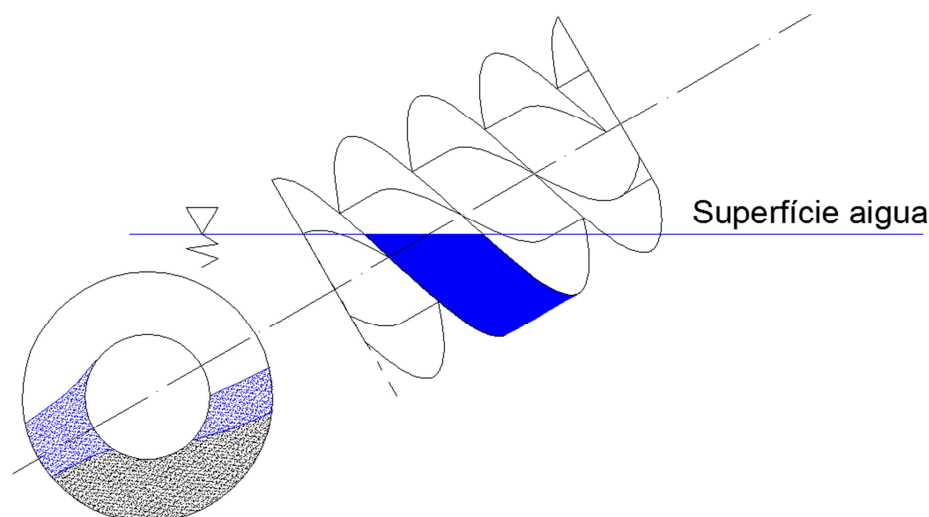
Imatge 1. 14: cargol d'Arquímedes modern.

No sempre aquesta fuga d'aigua es considera un desavantatge, ja que permet que el cargol dreni quan aquest roman aturat.

Així doncs, l'ús d'aquest tipus de mecanismes d'elevació d'aigua ha augmentat, degut al seu disseny senzill i la seva capacitat d'elevat les aigües residuals o residus continguts en aquestes.

El fet de que en els últims anys s'hagi optimitzat el disseny del cargol d'Arquímedes eliminant la part superior del cilindre exterior, *contrasta amb les bombes estudiades en aquest document, ja que en tots dos casos existeix un cilindre exterior totalment tancat.*

Un dels aspectes més complicats d'estudiar dels cargols d'Arquímedes ha estat el de quantificar la seva descàrrega. En aquest sentit, un conegut fabricant va publicar un manual amb recomanacions per tal de realitzar el disseny d'una bomba cilíndrica de cargol (Nagel, G. 1968), on s'aporten recomanacions basades en el coneixement empíric, no obstant, també s'indica un *mètode gràfic*, que es basa en projectar la superfície ocupada per l'aigua en la vista d'una secció perpendicular a l'eix del cargol.



**Imatge 1. 15:** projecció vertical del cargol i representació de la superfície d'aigua en una cambra compresa entre dos filets.

Així doncs, amb la projecció de la superfície es possible el càlcul del volum elevat en cada cambra i per tant es possible el càlcul del cabal descarregat. Els autors d'aquest manual redueixen el càlcul de la descàrrega del cargol a una expressió que depèn de la velocitat de gir del cargol  $n$ , del diàmetre dels filets del cargol  $D$  i d'un coeficient  $k$ , aquest últim calculat mitjançant el mètode anteriorment descrit. Així doncs, el cabal que descarrega un cargol d'Arquímedes segueix la següent expressió:

$$Q = k \cdot n \cdot D^3 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

**Eq 1. 1**

Aquesta mateixa expressió apareix en un llibre en el que parla de tècniques de drenatge (Wijdieks, J. & Bos, M.G. 1972, p. 965-998), on el coeficient  $k$  es dona en taules en funció de paràmetres interns com ara els diàmetres de l'eix i dels filets, la inclinació del cargol i el pas dels filets. Es evident, que els autors s'han basat en el manual anteriorment descrit, ja que es presenten alguns valors del coeficient  $k$  per a les configuracions més típiques com ara un cargol de tres o quatre filets amb inclinacions de 22, 26 i 30°.

Recentment s'ha publicat un article (Rorres, C. 2000), on mitjançant un **mètode matemàtic**, es calcula amb exactitud el volum contingut entre dos filets, a més, es realitza una tabulació amb les relacions dels paràmetres interns del cargol d'Arquímedes, amb els quals s'aconsegueixen cabals de descàrrega òptims segons el número de filets de la bomba, tanmateix aquest estudi es teòric perquè no té en compte pèrdues. L'autor de l'article va

comparar un dels primers dissenys d'un cargol d'Arquímedes, realitzat per l'enginyer i arquitecte Romà Vitroviu, amb un model teòric amb el mateix número de filets i els paràmetres interns seleccionats d'aquesta tabulació, on s'incloïa la relació del pas i el diàmetre dels filets, la relació entre el radi de l'eix del cargol i el diàmetre dels filets i el rati òptim de volum descarregat per volta. El resultat d'aquesta comparativa va resultar favorable al model teòric proposat, ja que amb els ratis de radi i de pas òptims s'aconseguia una major quantitat de volum d'aigua per volta del cargol, tant és així que s'incrementava en un 21% respecte al model proposat per Vitroviu.

A continuació es llisten una sèrie de paràmetres que ajuden a entendre millor la forma de determinar el cabal descarregat per aquest tipus de bombes. Es busca la comparativa entre les dades mesurades i les que és calcularan mitjançant el procediment gràfic descrit anteriorment. No obstant, aquest procediment no deixa de ser un mètode aproximat, ja que fa ús de relacions establertes entre paràmetres que es basen en la experiència d'un fabricant, però que dona resultat molt ajustats a la realitat tal i com s'hi podrà veure més endavant.

Es necessari un coneixement de les característiques més importants d'un cargol d'Arquímedes a l'hora de fer una planificació d'una instal·lació de bombament d'aigua, per una planta que s'hagi d'executar amb certs requeriments en quan a cabal i altura de descàrrega.

Aquestes característics més importants es llisten a continuació:

- L'angle que forma el cargol amb l'horitzontal.
- El diàmetre extern del cargol.
- El diàmetre de l'eix del cargol.
- El número de començaments o filets del cargol.
- El pas del cargol.
- La velocitat de rotació del cargol.
- La llargada del cargol.
- El nivell d'aigua a la part inferior del cargol.

- Les condicions de descàrrega del punt superior del cargol.

Per aconseguir que aquests paràmetres influeixin positivament en el rendiment del cargol, es necessari conèixer els efectes que produeix la variació d'algun d'aquests paràmetres sobre el cabal total descarregat i els diferents ratis que els relacionen entre ells.

### 1.5.2.1.- Determinació de la descàrrega

La base per a determinar la capacitat de descàrrega d'un cargol d'Arquímedes és el càlcul del volum unitari d'aigua que s'eleva. Aquest és el volum contingut entre el pas d'un filet i el tub de l'eix. En cada revolució realitzada pel cargol, cada filet elevarà aquesta quantitat d'aigua des del dipòsit inferior fins al punt de descàrrega situat en la part superior del cargol. Així doncs, el cabal descarregat pel cargol dependrà directament d'aquest volum unitari, del número de començaments i de la velocitat de gir de l'eix del cargol.

Aquest volum i per tant la capacitat del cargol també pot variar segons:

- La relació entre el pas i el diàmetre extern:

$$\sigma = \frac{S}{D} \text{ [adim.]}$$

Eq 1. 2

On,

$\sigma$  = relació entre el pas i el diàmetre exterior (adimensional)

$S$  = pas dels filets (m)

$D$  = Diàmetre exterior del cargol(m)

- La relació entre el diàmetre de l'eix del cargol i el diàmetre exterior (rati de radis):

$$\delta = \frac{d}{D} \text{ [adim.]}$$

Eq 1. 3

On,

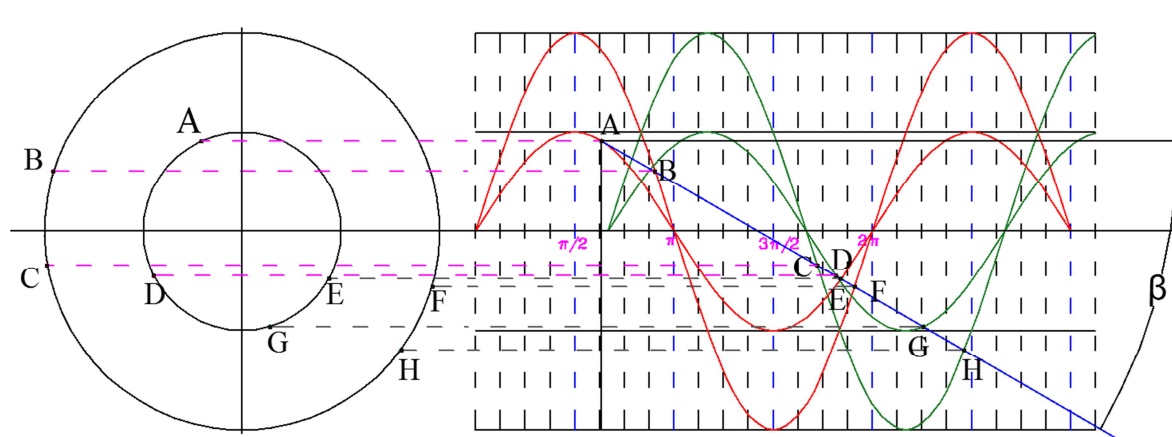
$\delta$  = rati de radis (adimensional)

$d$  = Diàmetre de l'eix del cargol(m)



- Inclinació del cargol amb l'horitzontal  $\beta[^\circ]$ .

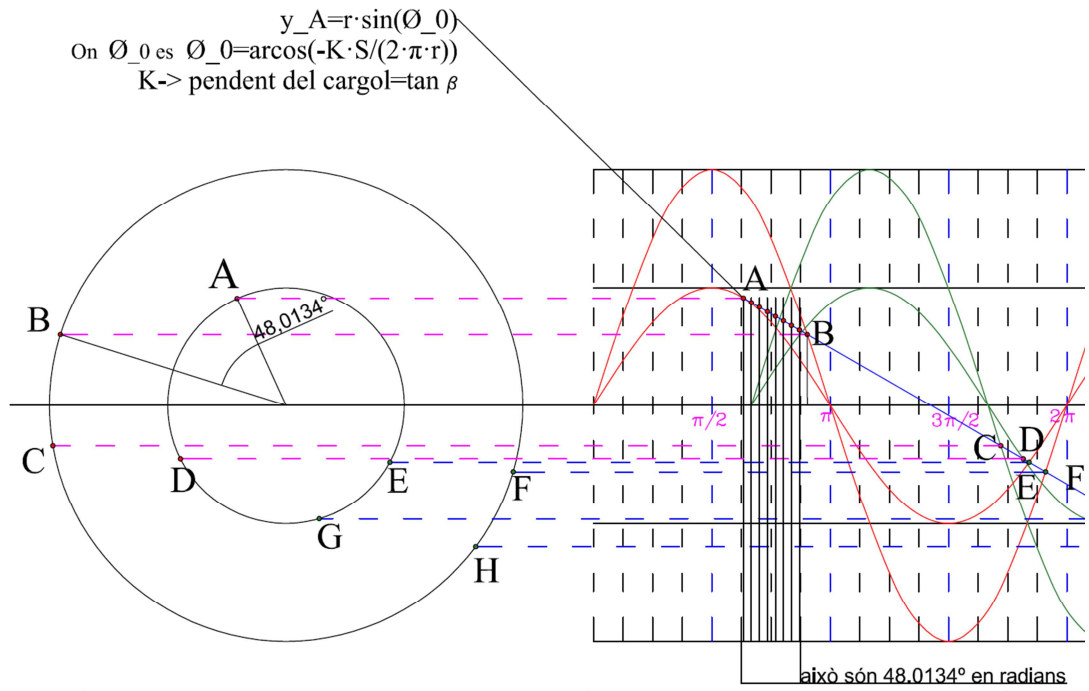
No es possible trobar una relació matemàtica simple amb la qual es pugui determinar la variació de la unitat de volum d'aigua i, per tant, la descàrrega del cargol en funció de la variació de  $\sigma$ ,  $\delta$  i  $\beta$ . En aquest sentit, el mètode gràfic (Nagel, G. 1968) dóna un resultat bastant pròxim a la realitat. Un dels paràmetres que més influència té sobre el volum descarregat per volta és la inclinació de l'eix del cargol, ja que d'això dependrà la quantitat d'aigua que hi entra en cada pas. En aquest mètode, es comença dibuixant el perfil de l'ona sinusoïdal que formen els àleps envoltant l'eix del cargol i, tot seguit, s'inclou la línia que indica la superfície de l'aigua per un cubell (*el terme cubell prové de la paraula "bucket" la qual es fa servir en la literatura anglosaxona per a definir el volum d'aigua inclòs entre dos filets*).



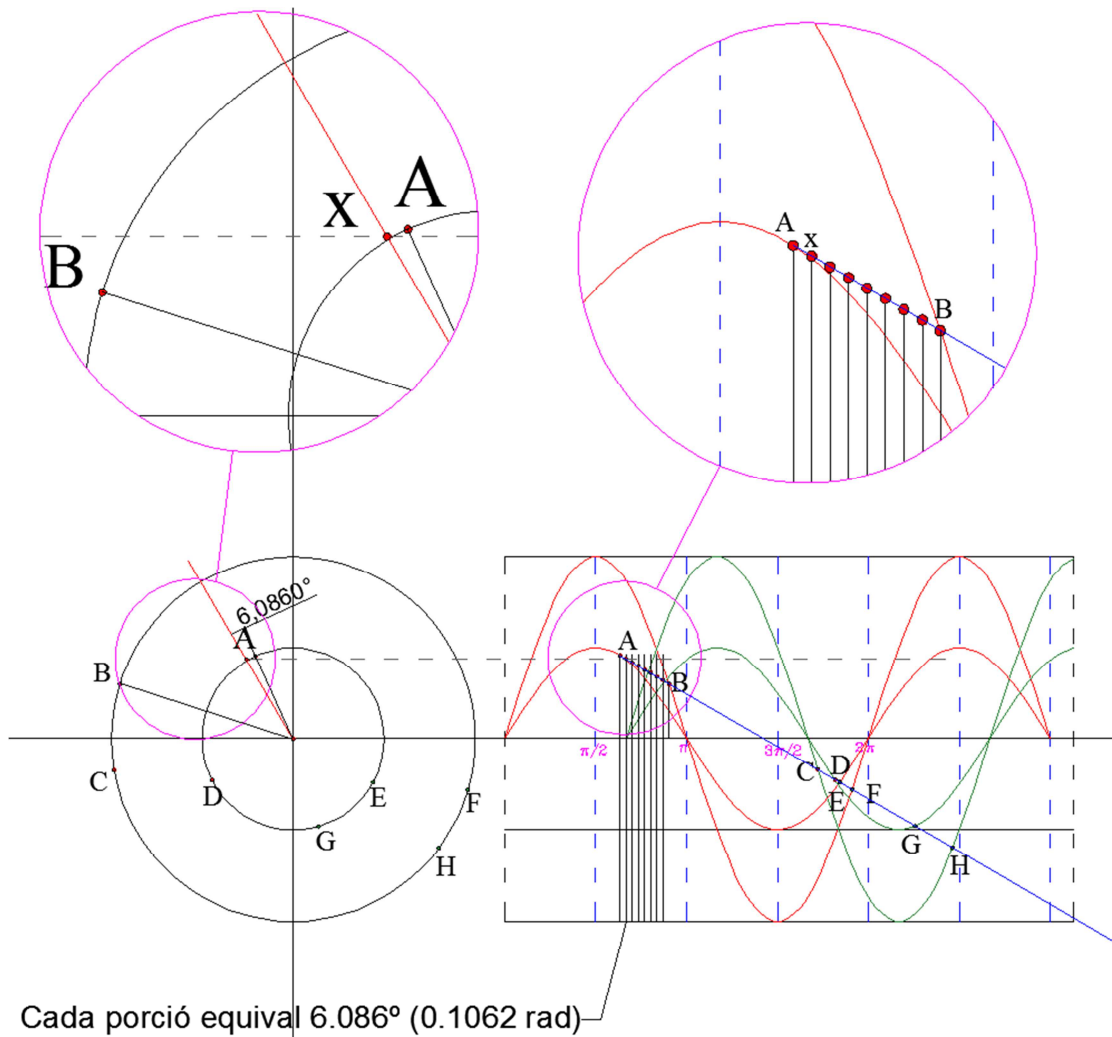
Imatge 1. 16: representació gràfica dels punts de tall de la superfície de l'aigua entre dos filets d'una bomba cilíndrica.

A continuació, es desplacen els punts de tall de cadascuna de les ones que formen una cambra, a una secció perpendicular a l'eix del cargol, tal i com es mostra en la **imatge 1.16**.

El següent pas, és la unió dels punts assenyalats en la imatge anterior, on aquestes línies indicaran la projecció de la superfície de l'aigua en aquesta secció, a la vegada, també donaran informació de com d'omplerta es troba la cambra del cargol. Per a fer-ho, es dividiran els segments delimitats pels punts de tall en parts iguals i es traslladarà aquesta divisió a la secció circular. No obstant, al traslladar-ho s'ha de tenir en compte que el desplaçament serà angular i no lineal, tal i com es mostra en les **imatges 1.17 i 1.18**.

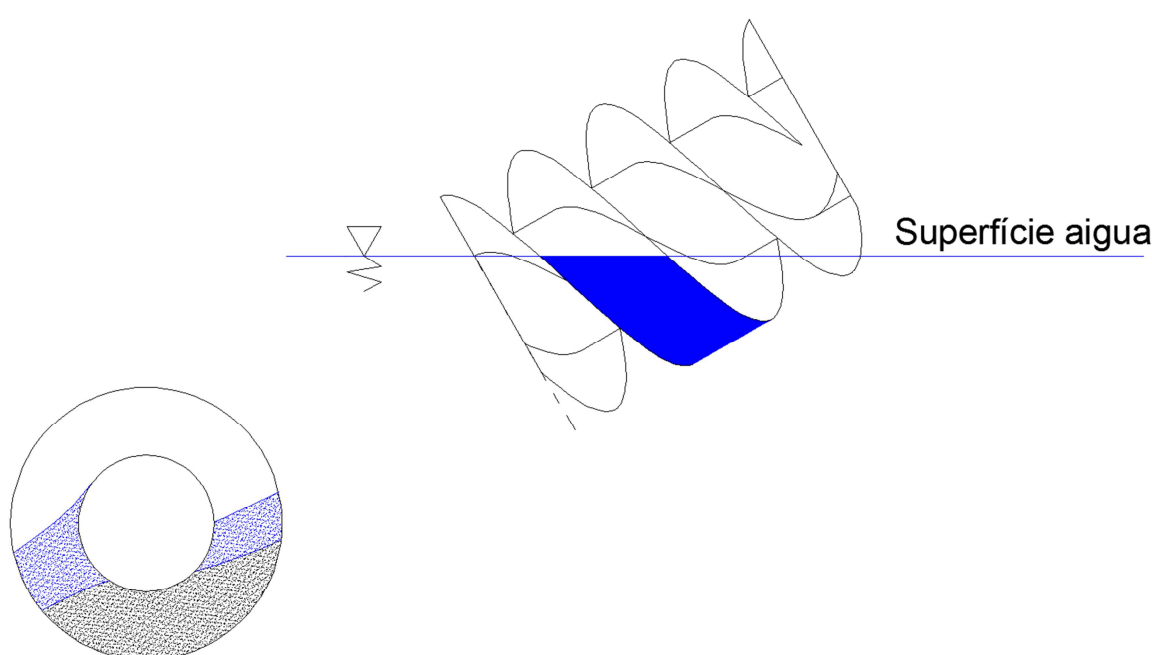


Imatge 1. 17: divisió dels segments entre els punts de tall de la superfície de l'aigua amb els filets del cargol (mètode gràfic).



Imatge 1. 18: trasllat d'un punt de tall intermig a la secció circular (mètode gràfic).

Una vegada s'han trobat tots els punts de tall amb els filets del cargol, es traça un línia d'unió entre aquests, fet que implica que tota aquella àrea que queda per sota de la línia C-D i G-H, simbolitza aquella part de la cambra que queda totalment plena, en contacte amb les dues parets que la delimiten. Una vegada s'han unit tots els punts quedarà visible l'omplerta que va la cambra, ja que depenent dels paràmetres interns, és pot donar una situació o una altra, així doncs, mentre més separats quedin els filets que defineixen una cambra, menys altura tindrà el cubell, mostrant una secció on gairebé tot el volum ocupat per l'aigua no estigui en contacte amb les dues parets que defineixen la cambra. En la següent imatge és mostra el resultat d'unir tots els punts trobats.



**Imatge 1. 19: projecció del volum contingut en un cubell (mètode gràfic).**

Una vegada s'ha realitzat els passos anteriors, s'està en disposició de calcular el volum contingut en la cambra, no obstant, la part més complicada serà la de calcular el volum d'aquella part del cubell que no té un contacte total entre parets. Per a fer-ho, es divideix la part assenyalada en blau en la secció del cargol de la **imatge 1.19**, en parts iguals, calculant per cadascuna d'aquestes el volum d'aigua que conté. Finalment, el volum resultant se li suma al volum que s'obté de multiplicar l'àrea en contacte total entre dos filets per la distància entre aquests.

(Per a més informació sobre el procediment del mètode gràfic veure annex 2). Així doncs, una vegada s'ha calculat el volum unitari ( $V_U$ ) present entre dos filets d'un cargol

mitjançant l'anterior mètode, el volum per cycle o volta ( $V_C$ ) realitzada pel cargol vindrà donat per la següent expressió:

$$V_C = a \cdot V_U [m^3]$$

**Eq 1. 4**

On  $a$  és el número de començaments del cargol.

Així doncs, una vegada s'ha calculat el volum descarregat per cada volta del cargol, l'expressió que definirà el cabal teòric que aporta el cargol serà:

$$Q_n = \frac{V_C \cdot n}{60} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

**Eq 1. 5**

Aquesta mateixa expressió ve representada en la literatura relacionada amb aquesta temàtica com:

$$Q_n = k \cdot n \cdot D^3 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

**Eq 1. 6**

On el terme  $k$  depèn directament dels resultats obtinguts en el mètode gràfic (veure annex 2).

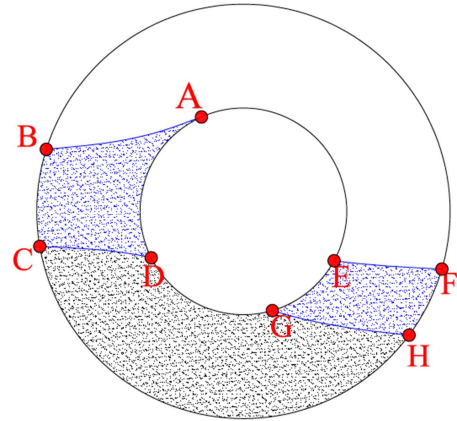
No obstant, fins al moment el cabal que s'ha calculat es teòric, és a dir, no s'han tingut en compte les pèrdues per fuites, encara que en instal·lacions ben dimensionades a aquest últim valor se li aplica un coeficient empíric  $A$ . On aquest pren normalment el valor de 1,15.

$$Q_n = \frac{V_C \cdot n}{60} A \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

**Eq 1. 7**

### 1.5.2.2.- Pèrdues per fuites

Evidentment, les pèrdues per fuites d'aigua tenen efectes adversos tan en la descàrrega com en l'eficiència. Tal i com es pot veure en la següent imatge en la que es representa la secció del cargol en el pla perpendicular a l'eix, la part inferior de l'arc C-H està sotmesa a una pressió diferencial amb una valor igual a  $h \cdot \sin \beta$ , on  $h$  és l'espai entre filets (veure annex 2, *imatge 2.15*).



Així doncs, és en aquesta zona on es produeixen més pèrdues de fluid, donat que per sobre la pressió és inferior. La quantitat d'aigua que es perd, no només

**Imatge 1. 20:** (en gris) zones del volum amb una pressió similar a  $h \cdot \sin \beta$  i, (en blau) zones del volum amb pressions de 0 a  $h \cdot \sin \beta$ .

depèn de la pressió, també depèn del coeficient de fricció  $\mu$ , el qual s'assumeix com a  $\mu=1$  per als càlculs que es realitzaran. D'altra banda, un factor que també és de gran importància és l'espai lliure entre el cilindre exterior del cargol i l'extrem del filet,  $S_{SP}$ .

Per tant, si es considera un coeficient de velocitat  $C_V=1$ , tindrem que  $V = C_V \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ , amb la qual cosa, es pot expressar el cabal fugat com:

$$Q_1 = 2,5 \cdot S_{sp} \cdot D \cdot \sqrt{D} \quad \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

**Eq 1. 8**

Així doncs, es pot definir el rendiment volumètric com,

$$\eta_v = \frac{Q_n - Q_1}{Q_n} \cdot 100 \quad [\%]$$

**Eq 1. 9**

D'altra banda, l'espai màxim entre el cilindre exterior i els filets s'acostuma a fixar en:

$$S_{SPmax} = 0,0045 \cdot \sqrt{D}$$

**Eq 1. 10**

Si  $S_{SP} < S_{SPmax}$ , les pèrdues de cabal solen se entre un 3% i 12% de cabal teòric  $Q_n$ .

### 1.5.2.3.- Rati de radis

Tan el diàmetre exterior del cargol com el diàmetre del seu eix, determinen en gran part el comportament de la màquina, encara que el diàmetre exterior depèn fortament de les condicions externes, és a dir, l'espai disponible o la seva posició i en canvi el de l'eix depèn de les interiors, és a dir, de les condicions mecàniques i de rigidesa del dispositiu.

La recerca realitzada per varis autors mitjançant el mètode gràfic, ha determinat que la màxima descàrrega s'obté amb ratis de radis  $\delta$  que es situen entre 0,45 i 0,55 (*Per a més informació consultar apartat 1.2.5.1 de la memòria*).

### 1.5.2.4.- Relació entre el pas del cargol i el diàmetre exterior

Desafortunadament, de igual forma que passa amb molts altres paràmetres del cargol d'Arquímedes, resulta impossible arribar a una relació aritmètica que determini el pas necessari entre filets. No obstant, normalment s'utilitzen les següents relacions segons la inclinació del cargol.

Inclinació $\beta(^{\circ})$	$\sigma = S/D$
$< 30^{\circ}$	1,2
$30^{\circ}$	1
$>30^{\circ}$	0,8

Taula 1. 4: relació de pas del cargol i el diàmetre exterior segons la inclinació del cargol.

Es obvi, que un altre factor que influeix en la selecció de  $\sigma$  és la grandària dels sòlid que han de passar entre els filets i les condicions de manteniment del mateix.

### 1.5.2.5.- Número de començaments o filets de la bomba de cargol

En el passat les bombes de cargol sempre han tingut un número de començaments que podien variar entre 1,2 o 3, ja que aquesta última configuració ha estat probablement la que ha donat sempre millors resultats i el disseny més utilitzat. En el manual sobre el disseny d'una bomba de cargol comentat anteriorment (Nagel, G. 1968), es destaca la comparativa que es va realitzar de tres cargols d'Arquímedes que presentaven les mateixes característiques constructives, amb diferents números de començaments, concretament un, dos i tres. El resultat obtingut en aquesta comparativa va estar que el cabal del cargol d'un sol filet era el

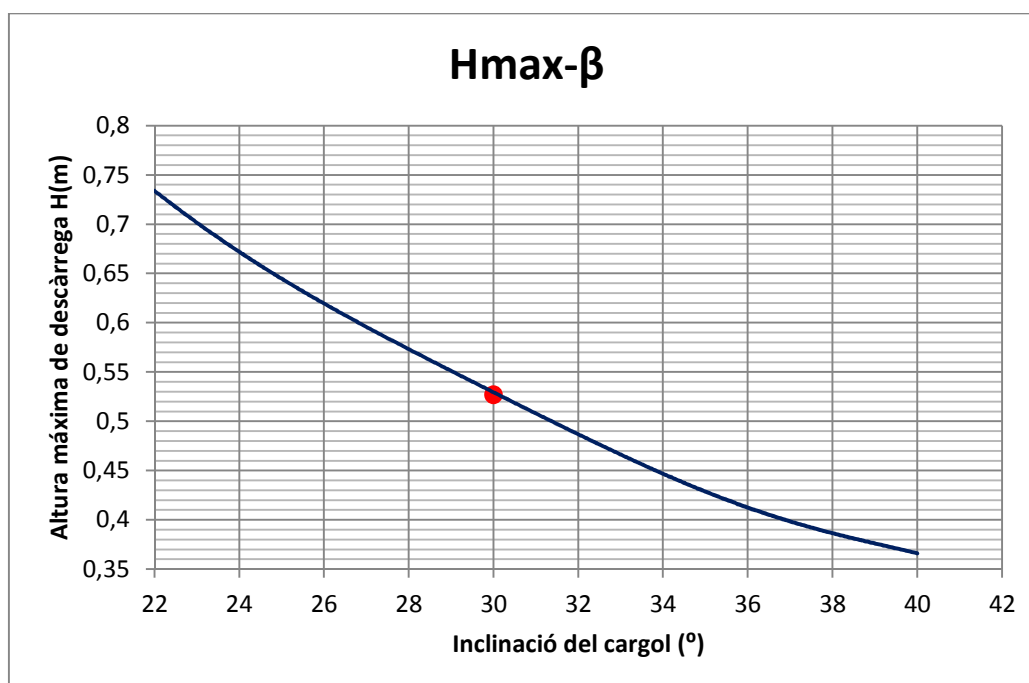
64% del cabal total impulsat per la bomba de tres filets i que el de la bomba de dos filets era del 80% sobre el cabal de la de tres filets.

Això pot donar una idea del que implica una reducció del número de filets d'un cargol, ja que d'aquesta comparativa es pot deduir que per cada filet de menys, el cabal es veu reduït en un 20%. Encara, que com ja s'ha comentat en l'anterior apartat, el cabal no és l'única factor a tenir en compte a l'hora de dissenyar un cargol d'Arquímedes i que la grandària dels sòlids i el manteniment també hi juguen un paper crucial.

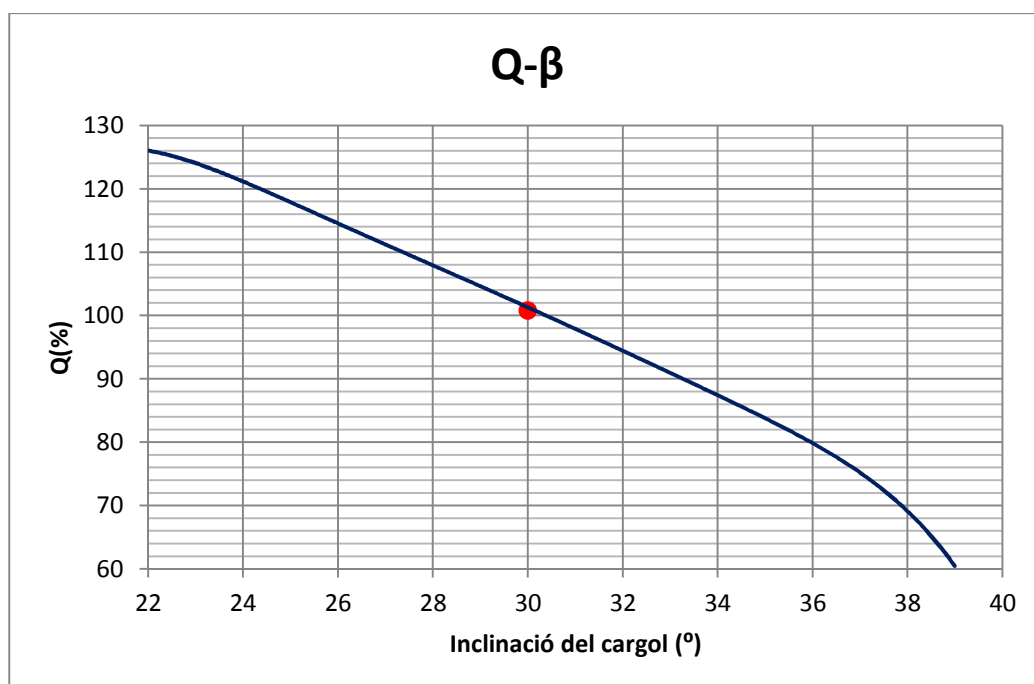
#### 1.5.2.6.- Angle d'inclinació del cargol amb l'horitzontal

En el manual anteriorment comentat (Nagel, G. 1968), es parla d'angles d'inclinació del cargol d'Arquímedes compresos entre 22 i 40°, ja que segons aquesta mateixa publicació són els angles que millors rendiments globals proporcionen de forma experimental.

En els següents gràfics publicats en aquest mateix manual, es mostra l'altura de descàrrega i cabal d'un cargol que s'aconsegueix segons l'angle d'inclinació d'aquest. En aquests gràfics, es pren com a 100% de la capacitat del cargol quan aquest té una inclinació de 30°, independentment del número de començaments. Així doncs, es pot diferenciar com la capacitat del cargol i l'altura màxima assolible augmenta o disminueix segons si l'angle d'inclinació disminueix o augmenta respectivament.



Imatge 1. 21: gràfica de la màxima altura assolible pel cargol segons el seu angle d'inclinació.



Imatge 1. 22: gràfica del cabal màxim assolible pel cargol segons el seu angle d'inclinació.

En la gràfica del cabal en relació amb l'angle d'inclinació del cargol, es pot veure com en el rang que va dels 22 als 40°, la reducció del cabal és aproximadament d'un 3% per cada grau de més que s'inclina el cargol. Aquest canvi en la capacitat, segons aquest llibre, es reproduïx per a tot tipus de cargols d'Arquímedes independentment de quin sigui el seu nombre de començaments o filets i amb variacions relativament petites amb rati de radis que variïn entre 0,4 i 0,6.

#### 1.5.2.7.- Selecció de la velocitat

És obvi que si es fa cas de l'expressió que s'ha definit anteriorment del cabal teòric, es podria arribar a confondre l'efecte que produeix la velocitat de rotació en el cabal descarregat. Ja que a simple vista, sembla que amb un velocitat major s'aconsegueixi una major capacitat de descàrrega. No obstant, això no es així, ja que una velocitat massa alta produeix efectes contraproductius, com ara un augment en les fuites d'aigua, majors pèrdues per fricció i per tant, una caiguda en el rendiment global de la màquina.

En la pràctica, s'ha comprovat que la velocitat màxima de rotació d'un cargol d'Arquímedes amb la que s'aconsegueixen òptims resultats, ve donat per l'expressió que es defineix a continuació, la qual assegura que les cambres entre filets tinguin la unitat de volum teòric d'aigua i evita un desbordament excessiu d'aigua pels laterals del cargol. No obstant, en

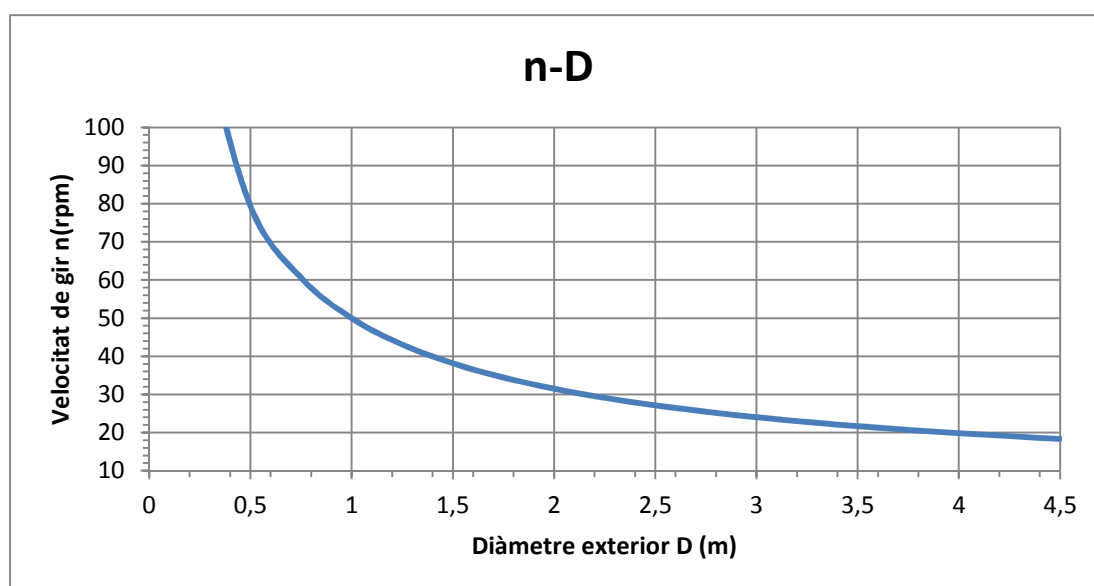


cargols amb diàmetres molt grans, es tendeix a augmentar lleugerament la velocitat per sobre d'aquest valor de referència, mentre que en el cas de diàmetres més petits no es aconsellable.

$$n = \frac{50}{\sqrt[3]{D^2}}$$

Eq 1. 11

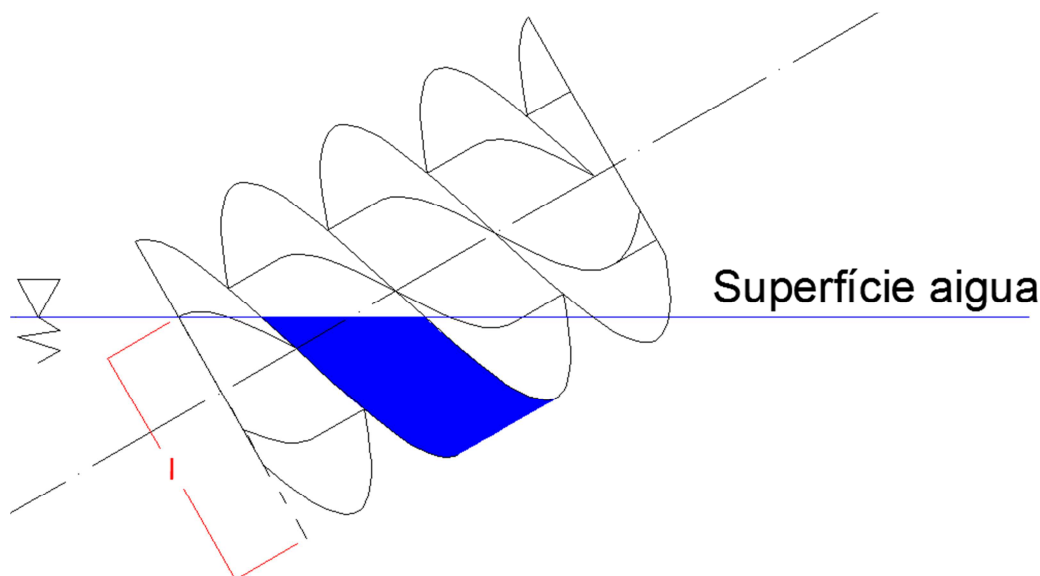
No es aconsellable una reducció de la velocitat de més d'un 40% sobre el valor màxim admissible, ja que el rendiment del cargol baixa dràsticament, així com el volum disponible en les cambres entre filets. D'altra banda, aquest percentatge és un número a tenir en compte en el cas que es dissenyi un cargol d'Arquímedes per una zona de drenatge que pugui patir futures ampliacions, permeten d'aquesta forma una capacitat extra en el cas de que així ho requerís. A continuació es mostra un gràfic en el que s'indica la màxima velocitat de rotació de l'eix per un cargol d'Arquímedes segons el seu diàmetre exterior.



Imatge 1. 23: velocitat màxima de gir d'un cargol d'Arquímedes en relació amb el seu diàmetre exterior.

#### 1.5.2.8.- Efecte de la profunditat d'immersió i el tancat total del cargol.

En el cas dels cargols d'Arquímedes estàndards moderns, per a permetre un ompliment complet de les cambres entre filets, així com una òptima descàrrega, és necessari que la immersió de la part inferior del cargol es faci fins al punt que es mostra en la següent imatge. Si no es així, les cambres no s'omplen completament, repercutint en el rendiment global del cargol.



**Imatge 1. 24:** profunditat d'immersió per a un òptim funcionament del cargol d'Arquímedes.

D'altra banda, en el cas que es sobrepassi aquesta altura d'aigua, el volum corresponent retornaria enrere, per tant, sense afectar al rendiment global de la màquina ni al seu correcte funcionament.

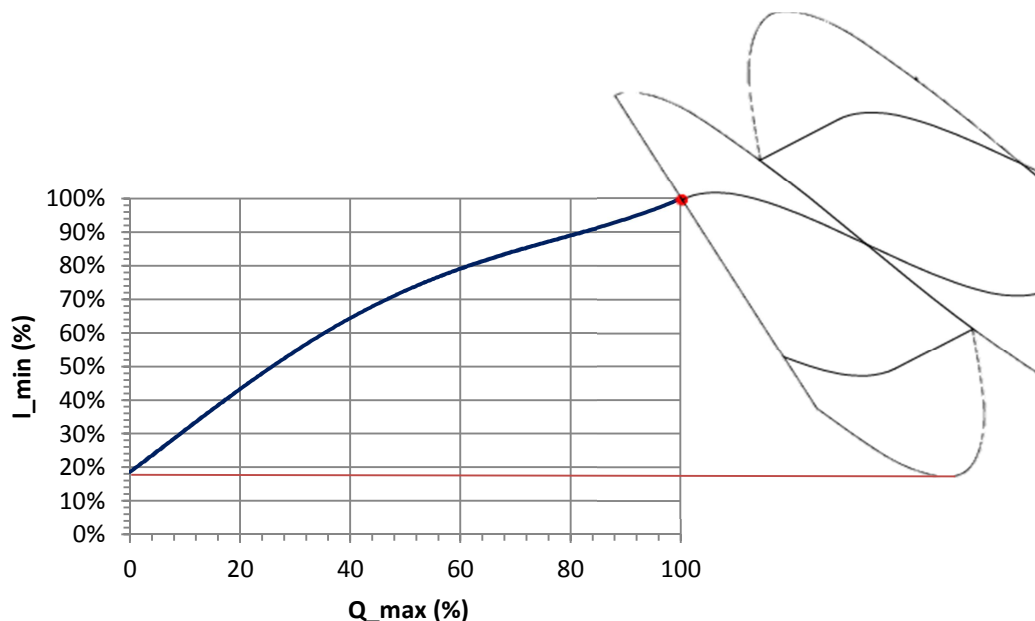
En aquest sentit es pot pensar que si el cargol té un cilindre exterior que el cobreix totalment, aquesta altura màxima  $l$  assenyalada en la figura anterior, es pot incrementar fins al punt en el que pugui cobrir tota la secció disponible; no obstant, per tal de corroborar-ho, s'ha construït un model d'una bomba cilíndrica totalment encapsulada a escala reduïda i s'ha analitzat l'efecte de la profunditat d'immersió a l'entrada d'aquest (*les conclusions d'aquesta comprovació es poden trobar en l'apartat de modelització d'aquest document*).

Així doncs, es pot definir l'alçada d'aigua que permet un òptim funcionament de les bombes helicoidals com:

$$l = (r + R) \cdot \cos \beta$$

**Eq 1. 12**

Com s'ha comentat, una profunditat d'immersió superior no farà augmentar el rendiment global del cargol, no obstant, un nivell per sota d'aquest mínim farà que aquest disminueixi dràsticament tal i com es mostra en el següent gràfic.



Imatge 1. 25: gràfic que relaciona la profunditat de la part inferior del cargol amb la descàrrega.

Veien el gràfic, es podria assumir com a regla que quan s'arriba a un 30% de la profunditat que assegura un funcionament amb un cabal  $Q_{max}$ , el cabal serà un 10% d'aquest. D'altra banda, el cabal descarregat serà nul quan la profunditat estigui entorn al 20% del valor de funcionament òptim. I per acabar, si la profunditat és del 50%, el cabal impulsat és un 25% del  $Q_{max}$ .

#### 1.5.2.9.- Pèrdues i diagrama de flux de potència

S'han de tenir en compte els paràmetres que intervenen a l'hora de parlar d'eficiència en una bomba cilíndrica fixa. En la **imatge 1.26** es mostra un esquema de les pèrdues que es produeixen en una bomba cilíndrica fixa considerant des de l'entrada de potència al motor fins a la potència útil cedida al fluid pel cargol. En la imatge es presenta la següent nomenclatura:

- Pèrdues elèctriques

$P_{CE} \rightarrow$  **pèrdues en el coure del estàtor**: pèrdues per efecte joule en el debanat de l'estàtor del motor.

$P_{nucli} \rightarrow$  **pèrdues en el nucli**: pèrdues per histèresi i corrents paràsites en el

*motor.*

**$P_{CR} \rightarrow$  pèrdues en el coure del rotor:** pèrdues per efecte joule en el cobre del rotor.

- Pèrdues mecàniques

**$P_{F\&V} \rightarrow$  pèrdues per fregament i ventilació del motor de CA.**

**$P_{misc} \rightarrow$  pèrdues miscel·lànies** (1% del total de pèrdues del motor de CA).

**$P_m \rightarrow$  pèrdues mecàniques:** pèrdues en els elements de transmissió i fregament dels coixinets.

**$P_{ph} \rightarrow$  pèrdues hidràuliques:** pèrdues per fregament de l'aigua amb la superfície del cargol.

**$P_v \rightarrow$  pèrdues volumètriques:** pèrdues de potència degudes a les pèrdues de cabal en la folgança entre els filets i el cilindre exterior o per esquitxament a l'exterior.

- Potència

**$P_{AG} \rightarrow$  potència en el entreferro** (potència entre el rotor i el estàtor del motor de AC).

**$P_{CONV} \rightarrow$  potència convertida:** potència convertida de la seva forma elèctrica a mecànica.

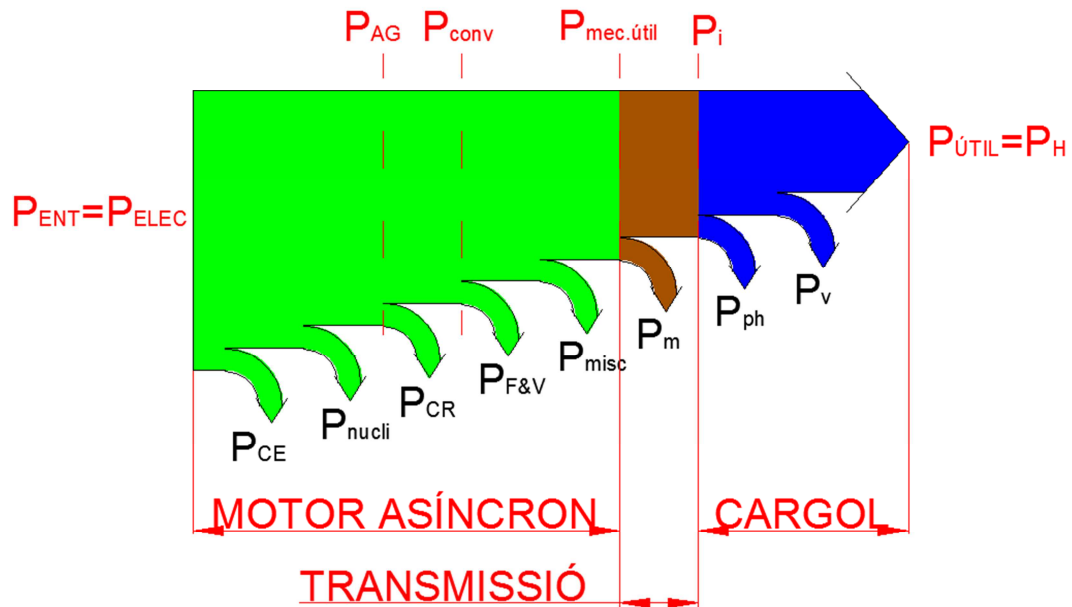
**$P_{mec.útil} \rightarrow$  potència mecànica útil a la sortida del motor.**

**$P_{interna} \rightarrow$  potència interna:** potència mecànica subministrada al cargol menys les pèrdues mecàniques.

$P_n \rightarrow$  potència hidràulica cedida al fluid considerant un cabal teòric  $Q_n$ .

$P_1 \rightarrow$  potència hidràulica desaprofitada considerant una pèrdua de cabal

$Q_1$ .



Imatge 1. 26: diagrama de flux de potència d'una bomba cilíndrica fixa.

Amb els paràmetres anteriors es possible establir quins són el termes de rendiment més importants que defineixen una bomba cilíndrica fixa:

$$\text{Rendiment global de la bomba cilíndrica fixa} \rightarrow \eta_g = \frac{P_H}{P_{ELEC}} \cdot 100 [\%]$$

Eq 1. 13

$$\text{Rendiment del motor} \rightarrow \eta_m = \frac{P_{mec.útil}}{P_{ELEC}} \cdot 100 [\%]$$

Eq 1. 14

$$\text{Rendiment de la transmissió} \rightarrow \eta_t = \frac{P_{mec.útil} - P_m}{P_{mec.útil}} \cdot 100 = \frac{P_i}{P_{mec.útil}} \cdot 100 [\%]$$

Eq 1. 15

$$\text{Rendiment hidràulic} \rightarrow \eta_h = \frac{P_i - P_{ph}}{P_i} \cdot 100 [\%]$$

Eq 1. 16

$$\text{Rendiment volumètric} \rightarrow \eta_v = \frac{P_n - P_1}{P_n} = \frac{Q_n \cdot \gamma \cdot h - Q_1 \cdot \gamma \cdot h}{Q_n \cdot \gamma \cdot h} = \frac{Q_n - Q_1}{Q_n} \cdot 100 [\%]$$

Eq 1. 17

$$\text{Rendiment intern} \rightarrow \eta_i = \frac{P_H}{P_i} \cdot 100 [\%]$$

Eq 1. 18

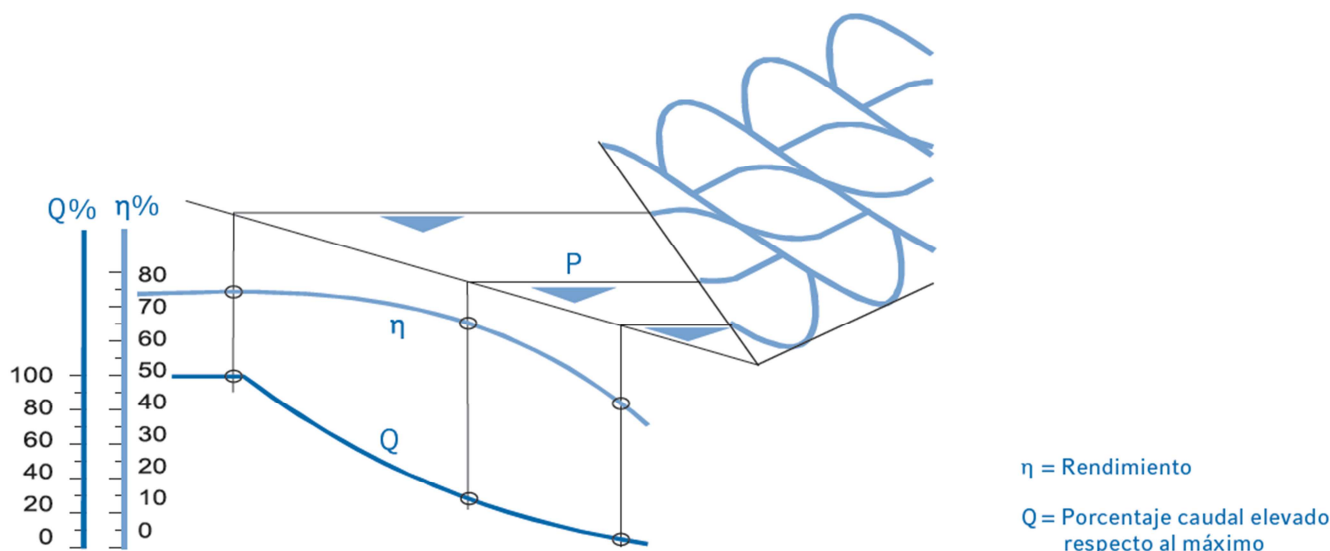
Aquest últim rendiment, el intern, engloba el rendiment hidràulic i volumètric:

$$\eta_i = \eta_h \cdot \eta_v [\%]$$

Eq 1. 19

El producte dels rendiments  $\eta_i \cdot \eta_t = \frac{P_H}{P_{mec.útil}} [\%]$  d'una bomba cilíndrica fixa treballant a plena càrrega és de l'ordre del 75%. En la **imatge 1.27** es mostra una corba d'aquest rendiment per una bomba cilíndrica fixa. Observant aquesta imatge, si el nivell d'aigua a l'entrada disminueix a un 33% del nivell òptim, tal i com passa quan aquest es troba en el punt P, el rendiment és del 65%. Expressant-ho d'un altra forma, per a variacions de nivell respecte el punt òptim a l'entrada, compreses entre 33,3% i 100%, aquest rendiment varia entre un 65% i un 75%.

Tal i com s'ha comentat, aquest és un dels factors més influents a l'hora de dictaminar les avantatges d'aquest dispositiu, sobretot en l'elevació d'aigües residuals, ja que per a nivells d'aigua baixos en la part inferior del cargol, aquest dóna rendiments bastant bons, a més, d'una freqüència d'arrancades satisfactòria, absència d'arquetes col·lectores profundes i el cabal impulsat varia d'acord amb el nivell que hi ha a l'entrada del dispositiu.



Imatge 1. 27: gràfic cabal-rendiment global d'una bomba cilíndrica fixa tipus CA de l'empresa COUTEX segons l'altura d'aigua a l'entrada.

L'últim factor és el més important, ja que les bombes de cargol reproduïxen la pauta d'un sistema d'aigües que flueix per gravetat, drenant progressivament l'aigua que els hi arriba, a diferència de les bombes centrífugues, que han d'enregar-se i parar-se segons es doni la situació.

Evidentment, la consecució d'un bon rendiment no es dona sense un bon dimensionament del motor elèctric, aquest és un dels factors decisius. Un paràmetre molt important que determina el rendiment del motor elèctric és la càrrega que s'hi aplica, així doncs, quan aquest treballa a càrrega nominal, el rendiment acostuma a ser del 85%. Aquest rendiment es sol mantenir fins a sobrepassar en un 25% la càrrega nominal. D'altra banda, hi apareix un efecte totalment oposat quan la càrrega aplicada al motor és molt petita, ja que quan aquest treballa amb una càrrega inferior al 25% el rendiment cau estrepitosament fins a valors molt petits, fent que el dispositiu sigui poc eficient per al seu comès.

### 1.5.3.- Metodologia

A continuació es defineixen els procediments que s'han dut a terme per a la presa de dades necessàries i posterior realització de l'anàlisi de les bombes helicoïdals, així com les condicions oportunes per a que es pugui donar una captació de valors els més fiable possible.

La característica dels canals de la zona, fa necessària la presa de dades ajustant-se a les èpoques o dies que comportin una menor utilització de recursos hídrics per part de la comunitat agrícola. Tan es així, que les dades s'han pres, consultant prèviament al vigilant de la comunitat de regants per tal de que les condicions que es donaven fossin adients. Així doncs, s'havia de donar el cas de que les aigües baixessin el més netes possibles, és a dir, el mínim número de sòlids en suspensió, ja que un dels estris utilitzats per a l'estudi del flux és molt sensible a l'aparició d'aquests i, per tant, una quantitat superior a la permesa podria haver condicionat les dades de camp.

Un altre problema afegit és el dels estris de mesura, ja que, tal i com s'ha especificat en l'apartat d'objectius, algunes de les mesures que s'han de pres són el cabal i els desnivells d'aigua entre d'altres. Per tant, això implicava la necessitat d'utilitzar una sèrie d'eines que poguessin adquirir aquestes dades en aforaments i que, a la vegada, permetessin realitzar lectures amb la màxima precisió i el més fiables possibles. En els següents apartats es farà una breu descripció dels aparells o mesuradors que s'han fet servir per cada cas.

La situació encara es més complicada, si es té en compte que la bomba cònica i la bomba cilíndrica de nivell variable, han estat fabricades a mida segons els requeriments de cada situació, a més de que no es compta amb molta informació gràfica per al seu estudi. Aquest fet suposa un problema a l'hora de la caracterització mecànica de les bombes, els elements interiors que les componen i el recorregut del fluid dins d'aquestes.

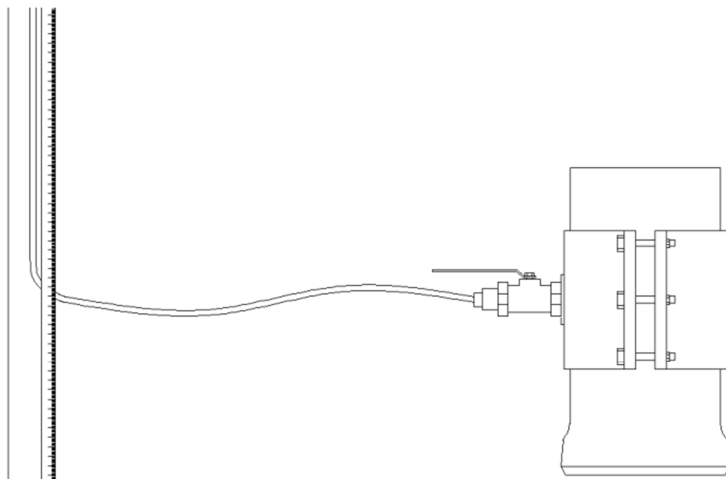
D'altra banda, pel que fa a les diverses instal·lacions, ha estat necessari que en tot moment hi hagués una persona autoritzada per tal de que es pugues realitzar la presa de dades. Això es dona, ja que en el cas de la bomba cilíndrica fixa i la de nivell variable, es troben localitzades en les instal·lacions de bombament de la Sèquia de l'Ala, per tant, només s'hi pot accedir amb personal autoritzat per la comunitat de regants de la zona. D'altra banda, en el cas de la bomba cònica, aquesta es trobava envoltada per una zona en obres i, per tant, ha estat necessària l'autorització de l'empresa constructora per poder accedir-hi.

#### 1.5.3.1.- Descripció de les dades adquirides

- *Mesura de la diferència d'altura d'aigua entre dos punts de referència:* mitjançant aquesta mesura es troba l'altura que guanya l'aigua a la sortida de la bomba. Amb aquesta dada es realitzarà el posterior càlcul de l'energia potencial que li cedeix la bomba al fluid. Per tal de realitzar aquesta mesura, es



disposarà d'un tub piezomètric configurat per un tub de niló grapat en un extrem a un llistó mil·límetrat i unit en l'altre extrem, a través d'una clau de seccionament, a un cubell format per un tub de PVC de diàmetre 160 mil·límetres, per tal d'evitar que la velocitat del flux produeixi interferències en les mesures. A continuació es mostra un esquema de muntatge d'aquest estri de mesura.



Imatge 1. 29: muntatge tub piezomètric.



Imatge 1. 28: cubell tub piezomètric

- *Mesura de cabal i velocitat del flux:* per a la realització d'aquestes mesures, es farà servir un mesurador de flux que utilitza l'efecte Doppler, a partir d'ara ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). El ADCP emet sons per sota de la banda audible, els quals impacten en una columna del corrent d'aigua. Les partícules suspeses en aquesta columna d'aigua fan rebotar aquestes ones sonores, produint un ressò que és detectat pel ADCP. Mitjançant la recepció d'aquests ressons, el ADCP pot determinar segons el temps en el qual triguen a arribar a aquest, la profunditat, el perfil de velocitats de les partícules que estan suspeses en aquesta columna d'aigua i la descàrrega. El ADCP detecta en quatre direccions ortogonals de forma simultània. Les freqüències emeses per les partícules que es mouen cap al mesurador són diferents que les que s'allunyen d'ell.



Imatge 1. 30: mesurador ADCP.

- *Mesura de nivell d'aigua (calat):* l'aparell que és utilitzat per tal efecte és un mesurador de nivell d'aigua. Es tracta d'un carret amb una cinta mètrica, on aquesta incorpora un capçal en la punta format per dos elèctrodes, quan aquest té contacte amb l'aigua tanca el circuit entre els dos elèctrodes, generant un senyal sonor i lumínic. Aquest aparell servirà per a poder establir nivells de calat de referència a l'hora de realitzar les mesures, ja que qualsevol canvi en el calat, implicarà una variació de les condicions particulars de cada mesura.



Imatge 1. 31: mesurador de nivell d'aigua.

- *Intensitat que circula per circuit elèctric de l'alimentació dels motors de les bombes:* s'utilitzarà un multímetre digital per monitoritzar la intensitat que hi circula pel circuit elèctric d'alimentació dels motors quan les bombes estan en funcionament . La lectura obtinguda s'utilitzarà per a fer els càlculs de potència consumida per les bombes quan treballen a diferents règims o cabals i d'aquesta manera poder traçar corbes de comportament elèctric.



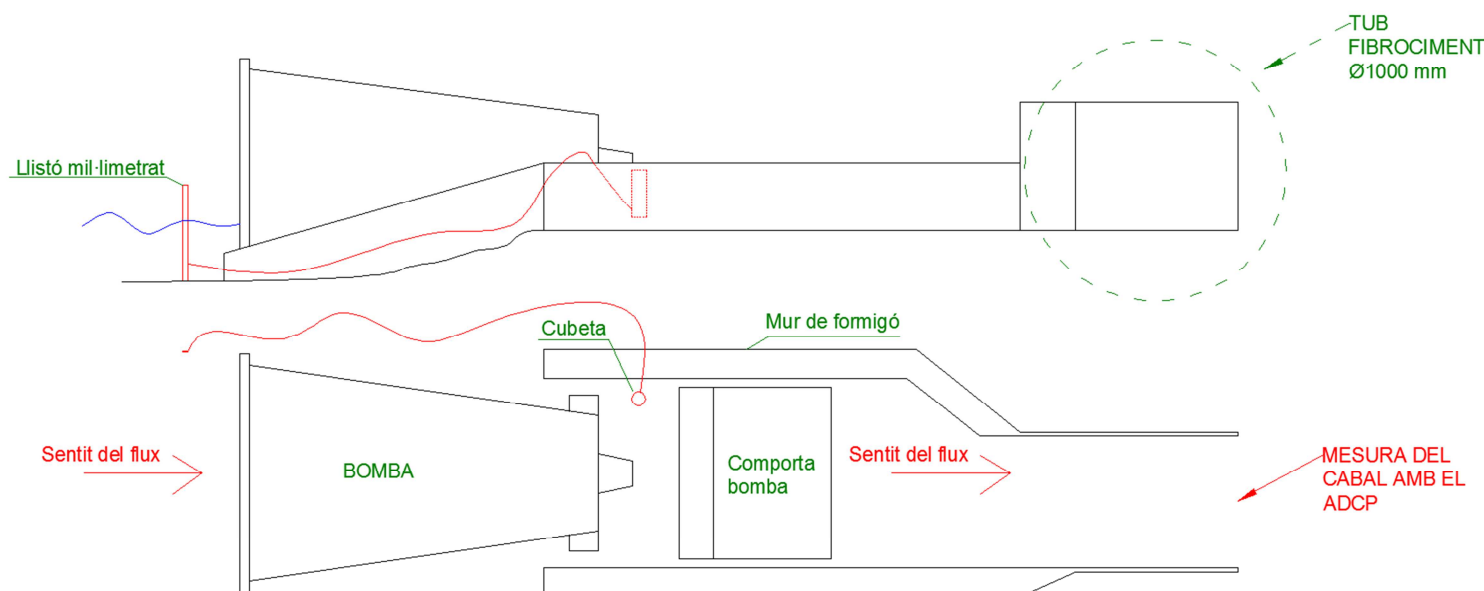
Imatge 1. 32: multímetre digital.

### 1.5.3.2.- Descripció dels punts de mesura

A continuació es descriuran les operacions que es van dur a terme per a poder recollir les dades referents a les diferències de nivells, quantificació de cabal i nivell de calat en la bomba cilíndrica fixa, la bomba cilíndrica de nivell variable i en la bomba cònica. En la realització de la presa de dades, es va optar per prendre simultàniament els tres tipus de mesures, de tal forma que quan s'hagi obtingut el cabal mitjançant el mesurador acústic, es pugui obtenir la diferència d'altures d'aigua vigilant en tot moment que el calat no varia. A més, la realització de les proves s'ha fet entre tres persones, degut a la necessitat d'ajuda a l'hora de remolcar el ADCP fins a l'altra riba del canal i d'altra banda per a que mentre un pren mesures d'altura d'aigua hi hagi algú que permanentment vigili el nivell de calat per a detectar qualsevol variació de les condicions.

- Bomba cònica

L'esquema de muntatge del tub piezomètric és el que es mostra a continuació, situant el cubell prop de la zona d'impulsió de la bomba i l'altre extrem del tub en la zona succió d'aquesta.



Imatge 1. 33: esquema muntatge del tub piezomètric en la bomba cònica.

D'altra banda, també es realitzarà una mesura del nivell de calat a la sortida de la bomba, ja que és l'únic punt en el que s'hi pot presentar alguna variabilitat, perquè depèn del cabal que baixa pel canal general de desguàs on hi desaigua la bomba. D'altra banda, el nivell

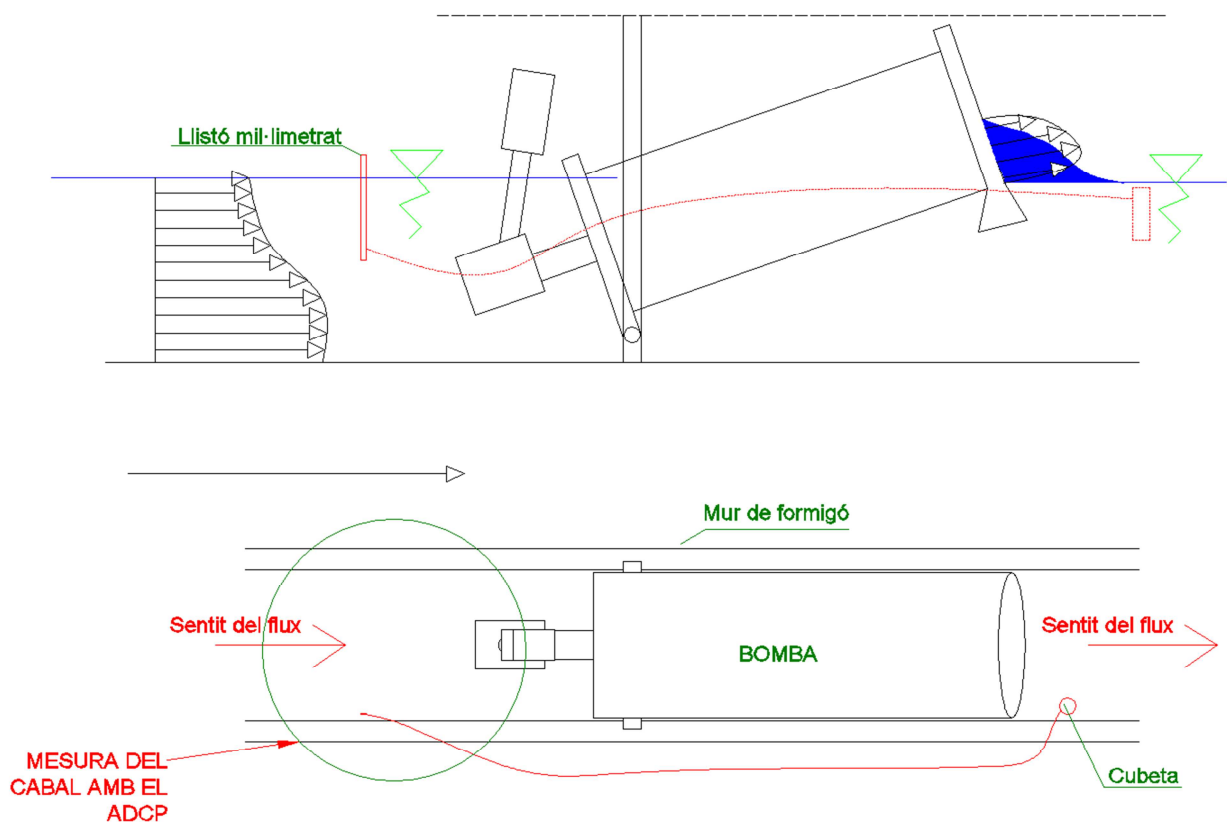
a l'entrada de la bomba roman bastant constant, ja que es tracta d'un parcel·la on no hi ha cap més aportació ni sortida d'aigua.

El punt on es mesurarà el cabal serà a la sortida d'un tub de fibrociment on es connecta el ramal per on desaigua la bomba amb el canal de desguàs general, ja que en aquest punt la profunditat es superior als 20 cm i hi han poques turbulències, la qual cosa permet que es pugui utilitzar el ADCP.

Com s'ha comentat anteriorment, un aspecte important en el cas de la caracterització de la bomba, és saber quina és la potència consumida per aquesta, en front l'energia subministrada al fluid. Per tant, és necessari la presa de dades elèctriques com ara voltatge i intensitat per cadascun dels punts de mesura. Per tal de mesurar-ho, es farà servir un multímetre, de tal forma que tinguem informació de la intensitat que hi circula en tot moment.

- Bomba cilíndrica de nivell variable

En aquest cas, el muntatge del tub piezomètric és molt semblant a al de l'anterior bomba tal i com es pot observar en la següent imatge.

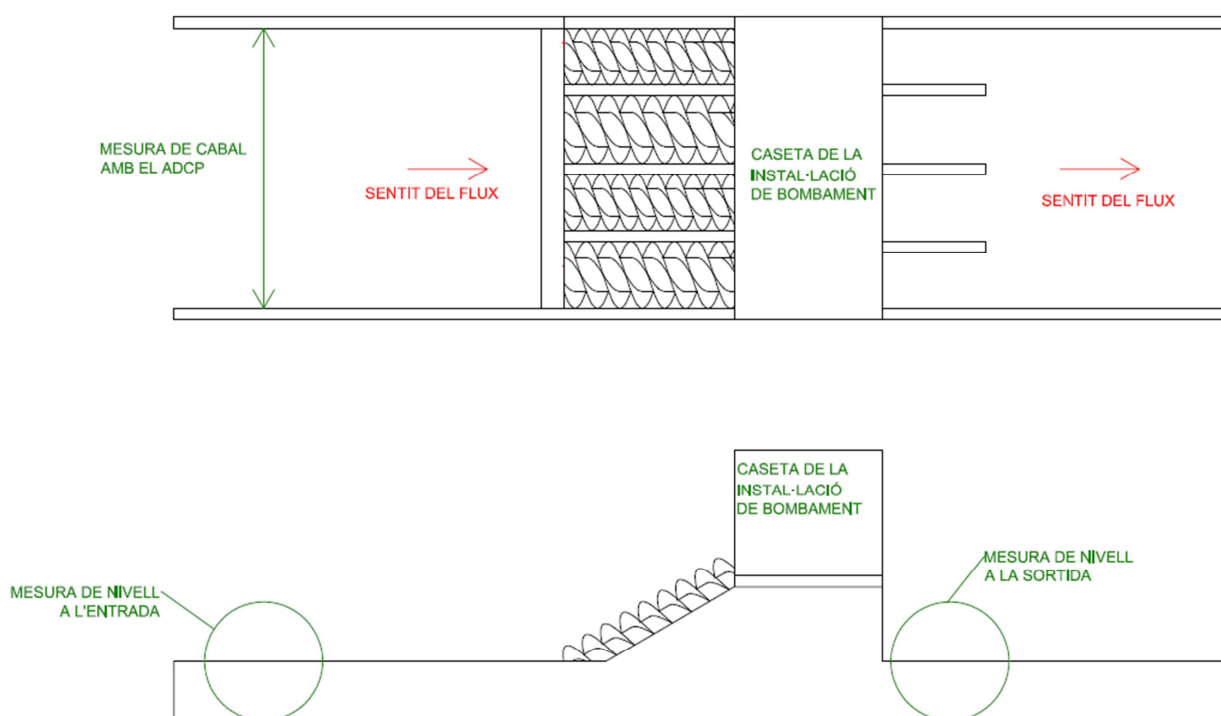


Imatge 1. 34: esquema muntatge del tub piezomètric en la bomba cilíndrica de nivell variable.

En aquest cas el nivell de calat s'ha controlat tan en l'entrada com en la sortida, a més, a diferència del cas anterior, s'ha realitzat la mesura de cabal a l'entrada de la bomba, tal i com es pot observar en l'anterior imatge, ja que era la zona menys bruta, amb menys turbulències i que tenia major profunditat. També s'ha pres les dades elèctriques corresponents al funcionament del motor per als diferents punts de funcionament que presentava la bomba, en aquest cas el motor disposava de tres marxes.

- Bomba cilíndrica fixa

En aquesta bomba va ser més complicat mesurar la diferència d'altura entre l'entrada i la sortida, ja que a l'entrada hi havia moltes turbulències i a la sortida no s'hi podia accedir, degut a que es trobava sota el forjat de la caseta de la instal·lació de bombament, per tant, l'únic punt on es podia mesurar era darrere de la caseta. El problema era que l'altura de descàrrega de la bomba estava més elevada i per tant, el desnivell mesurat no era l'altura real a la que la bomba estava elevant l'aigua, ja que l'aigua estava dissipant l'energia potencial que li havia cedit la bomba quan aquesta queia a nivell de la sortida. D'altra banda, es va mesura el nivell d'entrada en la mateixa zona del canal on es va mesura el cabal mitjançant el ADCP, ja que era la zona amb menys pertorbacions. En aquest cas, per a la mesura dels desnivells d'aigua es va utilitzar simplement el mesurador de nivell tant en l'entrada com en la sortida de la bomba.



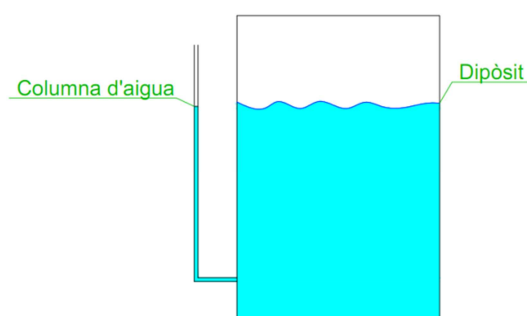
Imatge 1. 35: esquema de la presa de mesures de la bomba cilíndrica de nivell variable.

### 1.5.3.3.- Tractament de les dades

En aquest apartat es defineixen aspectes relatius a la lectura de les dades obtingudes i al posterior tractament d'aquestes per a cadascuna de les mesures realitzades, així doncs, es defineix amb més profunditat aspectes relatius a la visualització de dades en la columna d'aigua, utilització del ADCP i posterior tractament de les dades mitjançant el programa WinRiver II.

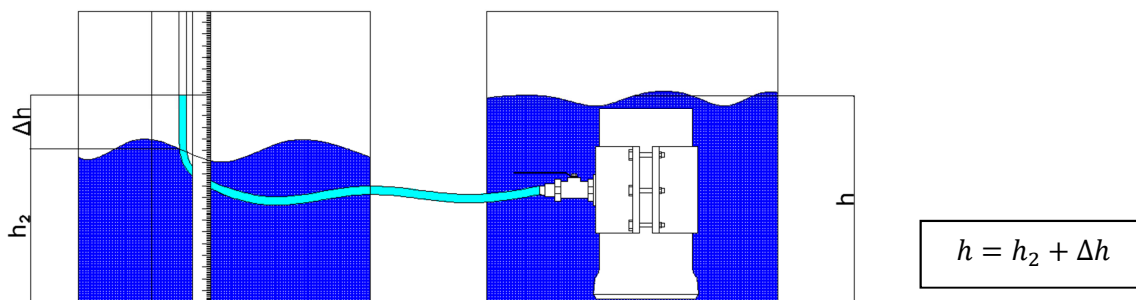
- Columna d'aigua

Tal i com s'ha comentat en els anteriors apartats, l'objectiu és mesurar desnivells d'aigua entre dos punts de referència. Evidentment, es tracta d'un simple piezòmetre que mesura la pressió d'un fluid quan aquesta es troba per sobre del zero manomètric. Es munta un tub de niló de manera que estigui connectat a un cubell que a la seva vegada estigui enfonsada en l'aigua. Aquest sistema és molt útil, per exemple, per conèixer l'altura del nivell d'aigua en un dipòsit, tal i com es mostra en la següent imatge.



**Imatge 1. 36: mesura de nivell d'aigua en dipòsits.**

No obstant, en el cas d'aquest estudi, no es tracta d'un dipòsit, sinó de conèixer quina es la pèrdua o guany de nivell d'aigua entre dos punts d'un mateix canal degut a la presència d'un obstacle o dispositiu de bombament. Així doncs, les mesures es prendran, en el cas que es tracti d'un obstacle, aigües avall i en el cas de la bomba aigües amunt. De manera que la lectura es simplifica a llegir la diferència de nivell entre el calat on es troba el cubell i la columna d'aigua del tub de niló. Per tal de representar-ho, es mostra un esquema on es pot visualitzar el procediment.



Imatge 1. 37: esquema procediment lectura columna d'aigua .

Així doncs, el líquid s'eleva en el tub fins aconseguir l'equilibri i, per tant, possibilitant la lectura per damunt del nivell amb el calat més baix. És evident, que no tindria cap sentit intercanviar els dos extrems del mesurador, ja que no podríem visualitzar la diferència d'altures, donat que el nivell a la columna d'aigua es trobaria per sota nivell d'aigua.

- Mesurador de cabal ADCP

Per a la utilització d'aquest aparell, es farà anar un ordinador de butxaca, a partir d'ara PDA (personal digital assistant). Aquesta servirà com a nexe de comunicació entre l'usuari i el ADCP, mitjançant una connexió Bluetooth.



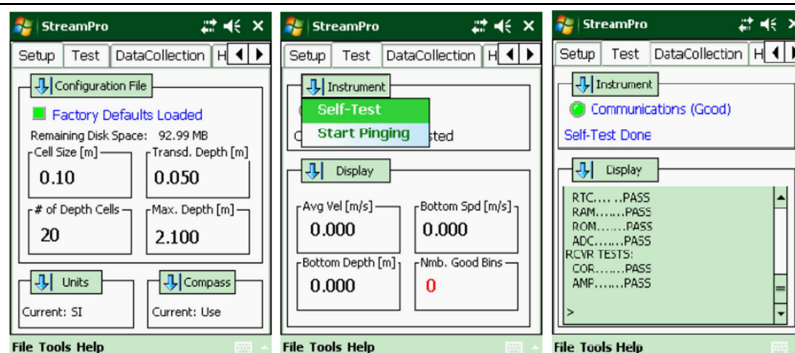
Imatge 1. 39: PDA per a connexió amb ADCP.



Imatge 1. 38: connexió Bluetooth del vaixell ADCP.

La PDA incorpora un software especial del fabricant del ADCP en el que es poden visualitzar les dades recollides per el sensor en temps real. A més, es pot realitzar un auto test del sensor del vaixell per a comprovar que tots els sistemes de mesura d'aquest es troben calibrats i en perfecte estat per a la presa de dades.





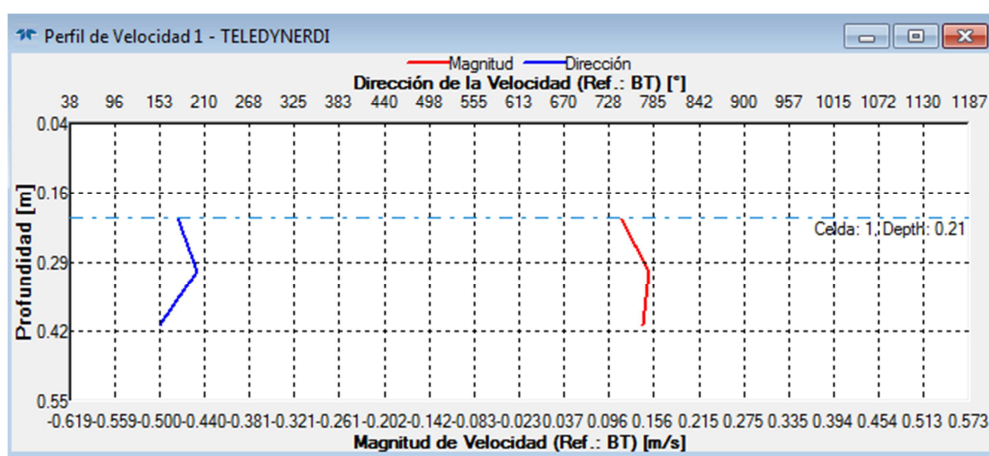
Imatge 1. 40: (de esquerra a dreta) finestra de configuració de paràmetres de mesura, finestra presa de dades en temps real i finestra d'auto test.

El ADCP quantifica el desplaçament de l'aigua mitjançant l'efecte Doppler, és a dir, el canvi aparent de freqüència d'una ona respecte el moviment relatiu d'una partícula amb el seu observador, en aquest cas, la sonda ADCP. Mitjançant aquest efecte, la sonda pot mesurar la velocitat relativa de l'aigua respecte aquesta i la seva pròpia velocitat i direcció al llarg del fons del canal. No obstant, els detalls de les mesures seran diferents en un fons sòlid en comparació a les dades subministrades pel flux.

Les dades que pot recollir el ADCP són les que es llisten a continuació:

- Perfils de velocitat

Per a la presa de dades, el ADCP divideix la columna d'aigua sobre la que es troba en un número específic de segments apilats en vertical, aquests són les denominades cel·les de profunditat (Depth Cells) o cel·les de mesura. La sonda determina la velocitat i la direcció per cadascuna d'aquestes cel·les, de manera que posteriorment aquestes dades es podran representar en un gràfic de velocitats en funció de la profunditat, obtenint un perfil de velocitats des de la superfície fins al fons.

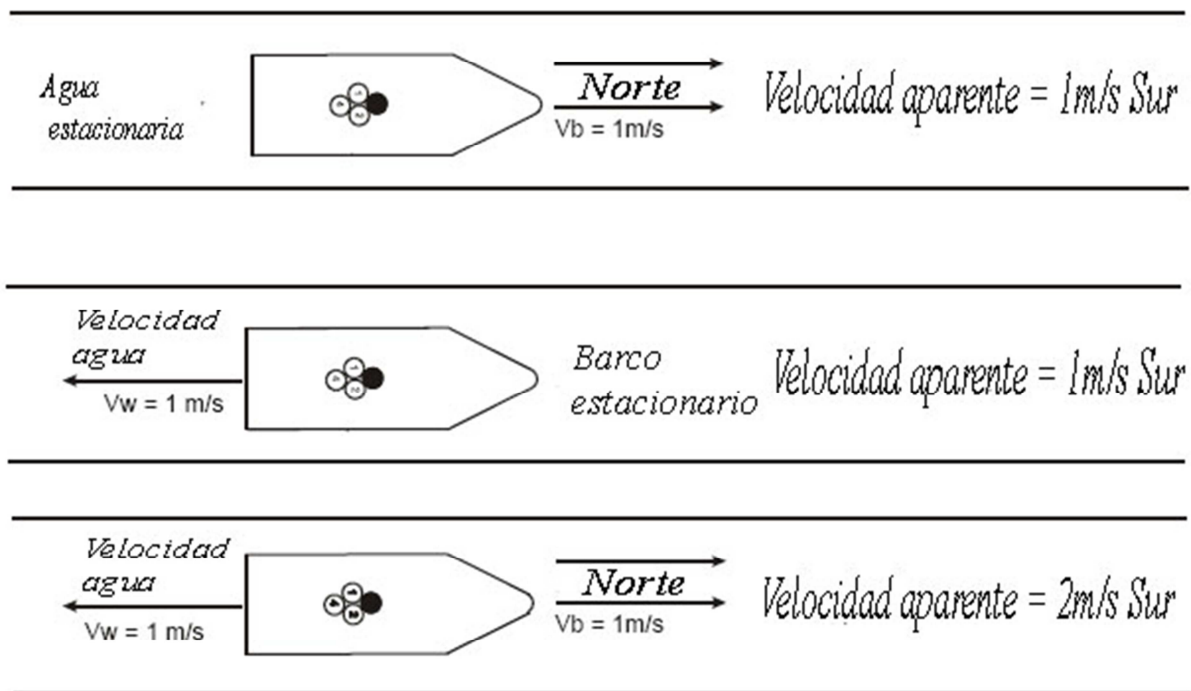


Imatge 1. 41: gràfic de perfil de velocitats del programa WinRiver (RD Instruments).



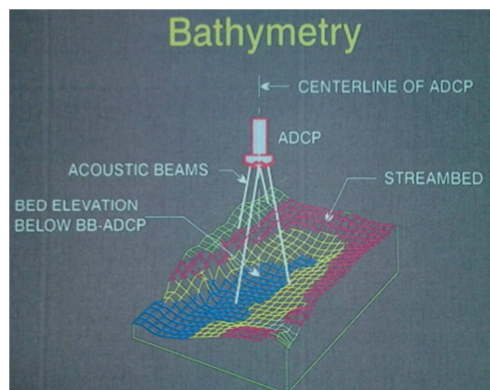
○ Referència del fons (Bottom tracking)

Es tracta d'una referència posicional de l'aforador respecte al fons estàtic de la llera en el seu desplaçament sobre el riu. A l'hora de realitzar la presa de dades, el ADCP mesura la velocitat relativa i la direcció de l'aigua a aquest. És a dir, si pensem en un ADCP movent-se en direcció nord-sud en sentit nord a 1m/s a través d'un flux d'aigua en sentit sud i velocitat de 1m/s, la velocitat aparent serà de 2 m/s. No obstant, mitjançant la referència de fons, es quantifica la velocitat i la direcció del ADCP respecte el fons del canal, per tant, aquest extrau la velocitat del ADCP, la velocitat relativa del aigua i determina la verdadera velocitat de l'aigua respecte el fons. A continuació es mostra una imatge on s'explica de forma gràfica aquest fet.



Imatge 1. 42: velocitat de la sonda-flotador respecte l'aigua.

No obstant, una altra funció molt important del bottom-tracking és la de realitzar la batimetria del fons del canal, el qual determina el contorn inferior de la secció transversal de la llera, a fi de poder integrar així el cabal total que passa pel canal.



Imatge 1. 43: batimetria del StreamPro.

- Altres mesures recollides per el ADCP

Altres dades que recull el sensor són les que es llisten a continuació:

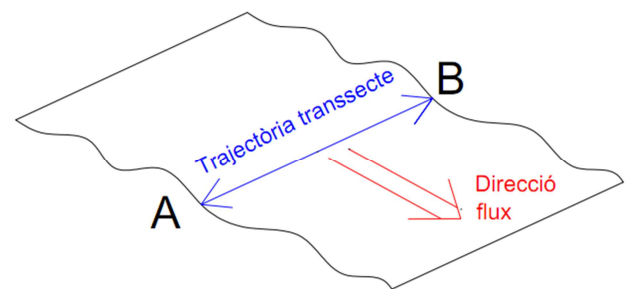
1. Temperatura: un sensor en el capçal del transductor mesura la temperatura de l'aigua. Donat que la mesura de la velocitat depèn de la velocitat amb la que es transmeten les ones acústiques propagades per el sensor, aquest utilitzarà la temperatura juntament amb un valor de salinitat introduït per l'usuari, per tal de trobar la velocitat del so propagat.
2. Brúixola (Compass): el ADCP disposa d'una brúixola que enregistra l'orientació relativa del ADCP respecte el centre de gravetat terrestre.
3. Caboteig i balanceig (Pitch and roll): l'aparell disposa d'un sensor per a mesurar els cabotejos i el seu balanceig, que posteriorment li permet al software WinRiver realitzar correccions de les dades de velocitat.
4. Intensitat: també es recull la intensitat dels ecos acústics rebuts i retornats per l'energia escampada fora de les partícules en suspensió. Aquesta informació resulta útil per a verificar el funcionament del ADCP, ja que també ofereix una representació visual de com es distribueix el sediment del fons d'un canal.
5. Correlació: és l'amplitud de la funció de correlació en cada profunditat de cel·la, extreta per el ADCP com a símbol de la qualitat de les dades.
6. ADCP percentatge bo: l'aparell pot fer un mitjana de les dades dels polsos individuals, la qual cosa li permet crear agrupacions de dades abans de ser

emeses. Si per alguna raó un pols conté una dada errònia, aquesta informació no s'inclourà.

7. Percentatge de dades bones per transsecte: el software WinRiver presenta un percentatge de valors correctes que és diferent a aquest en les dades errònies. Aquest valor representa el percentatge de descàrregues calculades que són vàlides en una cel·la en particular.
8. Temps real: es disposa d'un rellotge de temps real amb una precisió de 0,01 segons. El temps entre agrupacions multiplicat per la velocitat del flotador, és el desplaçament d'aquest entre agrupacions. S'usa per a calcular la descàrrega, així com per a dibuixar la trajectòria del flotador.

- Els fonaments de la mesura de cabal per part del ADCP

La típica mesura de descàrrega es calcula mesurant les dades recollides en varis trajectes. Tal i com veiem en la següent imatge, un transsecte és la trajectòria del flotador des del punt A fins al punt B, on recull un cabal ( $\sum Q_1$ ). El segon transsecte es farà des del punt B al A, amb la qual cosa s'obtindrà una altra mesura de descàrrega ( $\sum Q_2$ ). Aquest procés es va repetint fins a obtenir el número de transsectes desitjats. Essent recomanable al menys quatre transsectes parells d'un mateix lloc per tal de calcular la descàrrega d'aquella secció. Es evident, que la descàrrega serà la mitja dels cabals respecte el número total de transsectes (N).



Imatge 1. 44: trajectòria transsecte.

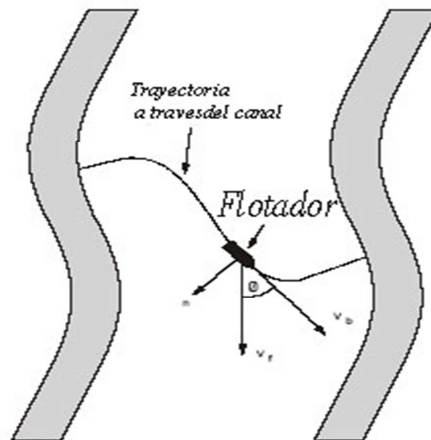
$$\Sigma Q_T = \frac{\Sigma Q_1 + \Sigma Q_2 + \Sigma Q_3 + \dots + \Sigma Q_N}{N} [m^3]$$

Eq 1. 20

- La independència de la trajectòria

El cabal o descàrrega és el flux acumulat que creua perpendicularment a la trajectòria del flotador. Qualsevol línia arbitrària pot definir la secció transversal al llarg de la corrent. Aquesta no ha de realitzar-se necessàriament de forma perpendicular al canal. El ADCP mesura la secció controlant els canvis de posició del flotador, juntament amb la mesura del calat. Això facilita la obtenció d'una medició fiable, particularment en canals amplis, llocs

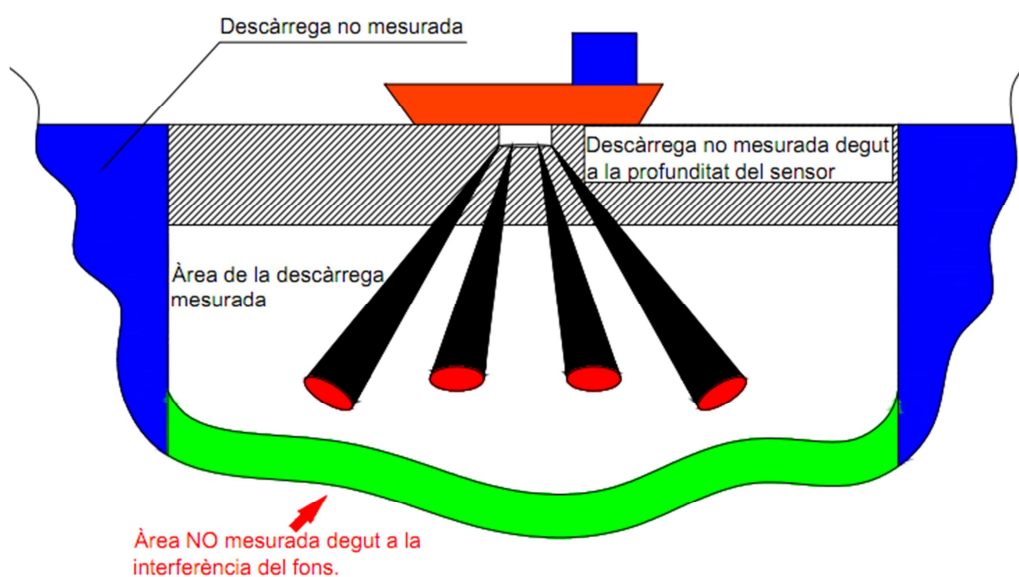
amb un flux dens, sobretot en períodes de crescudes. Finalment, el software WinRiver compilarà aquesta informació per obtenir el cabal resultant.



Imatge 1. 45: independència de la trajectòria realitzada pel ADCP per tal de calcular la descàrrega.

- Mesures directes i regions estimades

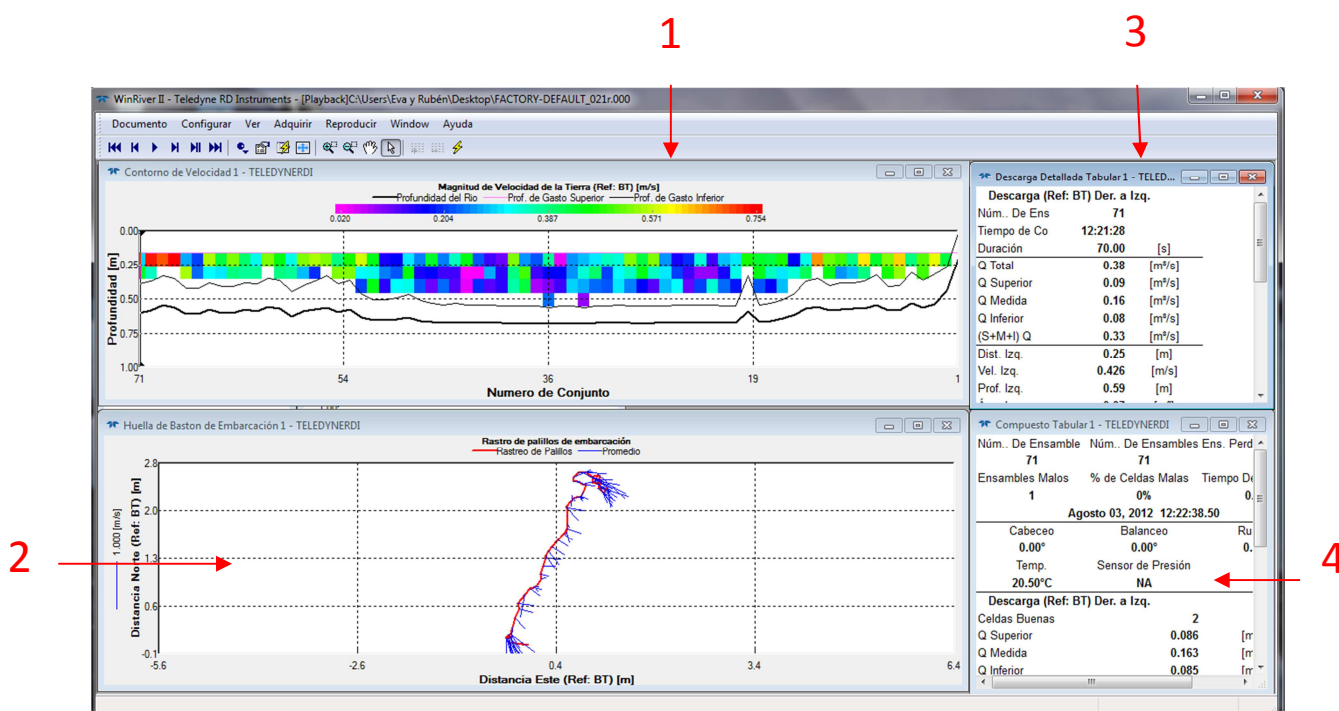
L'ADCP mesura la majoria de les dades de velocitat de l'aigua des del capçal del sensor, fins el 6% per damunt del nivell del fons del canal. De igual forma passa amb les voreres dels canals, la profunditat de les quals no és suficient per a que el sensor funcioni, això delimita regions on es quantifica directament el cabal, per la qual cosa, per a determinar el cabal que hi circula per aquestes zones, el ADCP incorpora una sèrie d'algoritmes de càlcul, que requereixen de dades aportades per l'usuari sobre la distància del inici i final del transsecte realitzat per aquest fins al límit de la llera.



Imatge 1. 46: regions estimades i no mesurades pel ADCP.

○ Processament i presentació de les dades (WinRiver II)

Per a la programació de l'aforador, procés de les dades i presentació de les mateixes en pantalla, existeix un software que serveix per a bolcar les dades obtingudes amb el ADCP a l'ordinador, aquest software rep el nom de WinRiver II.



Imatge 1. 47: menú navegació WinRiver II

La pantalla del menú de WinRiver II es divideix en quatre requadres per una adequada separació de la informació:

1. El requadre superior, a l'esquerra, mostra la secció de riu, la seva batimetria i magnitud de la velocitat mitja en tots els punts de la secció amb una escala de colors.
2. En el requadre inferior esquerra es mostra en roig la trajectòria seguida per l'aforador al passar d'una riba a l'altra oposada. En color blau apareixen els vectors corresponents a la velocitat mitja de l'aigua, en magnitud i direcció, per a cadascuna de les posicions de la trajectòria. Aquesta velocitat mitja es refereix a cada columna vertical, on s'hi poden presentar, també, les dades per cada cota.

3. En el requadre superior dret apareixen les dades de navegació, és a dir, la velocitat de l'aforador en el seu desplaçament, el rumb i la longitud de tot el trajecte seguit, el temps utilitzat, etc.
4. Finalment en el requadre inferior dret es mostren les dades de cabal amb les aportacions parcials de cada component de la secció, juntament amb el valor total del cabal resultant.

### 1.5.4.- Resultats

#### 1.5.4.1.- Anàlisi de les dades adquirides

A continuació es mostren els quadres resum on es poden veure les dades mesurades de cadascun dels dispositius de bombament analitzats, on és fàcil de manifest el comportament energètic i hidràulic que tenen, tot indicant el rendiment global de les bombes per a les condicions actuals de treball en les que es van prendre les mesures (*la resta de dades mesurades es poden trobar en els annexes 3, 4 i 5 d'aquest document*).

- **Bomba cònica**

En aquest primer quadre resum, es mostra l'evolució del cabal elevat pel cargol  $\overline{Q_c}$ , l'energia cedida a l'aigua  $H$ , la potència hidràulica desenvolupada  $P_H$ , la potència elèctrica consumida pel motor  $P_{elec}$  i el rendiment global de la bomba, tot en funció de la velocitat angular de gir de l'eix del cargol  $n$ . (*En l'annex 3, està la informació referent al tractament de les dades que s'han pres per aquest dispositiu i que han permès arribar a l'obtenció d'aquest quadre resum*).

$n(\text{rpm})$	$\overline{Q_c} (\text{m}^3/\text{s})$	$H(\text{m})$	$P_H(\text{W})$	$P_{elec}(\text{W})$	$\eta_g(\%)$
3	0,056	0,266	147,155	554,949	26,52
10	0,222	0,282	614,162	2.466,440	24,90
14	0,412	0,319	1.286,770	4.316,270	29,81
17	0,544	0,352	1.880,120	6.166,100	30,49
20	0,635	0,389	2.424,620	7.399,320	32,77

Taula 1. 5: resum de les dades adquirides de la bomba cònica.

En primer lloc, observant la columna de les dades de cabal, és obvi que no es tracta de cabals molt elevats en comparació amb la geometria de la bomba, ja que per contra, si ens hi fixem en les dades de projecte de la bomba cilíndrica fixa, la qual té un diàmetre dels filets de tres metres tal i com s'exposa en l'apartat 1.2.1.1, el cabal nominal d'aquesta és major que l'observat per la bomba cònica, quan per aquesta última, la velocitat de gir és màxima i la inclinació de l'eix és de  $0^\circ$ . D'altra banda, una altra dada de la taula anterior que es bastant interessant, és l'energia cedida al fluid i la potència hidràulica desenvolupada, ja que són valors relativament baixos en comparació amb la potència elèctrica que consumeix el motor. Aquest fet té relació directa amb el volum d'aigua elevat i amb l'altura a la que s'eleva aquesta. Es podria dir que la bomba estava acompanyant l'aigua d'un extrem a l'altre amb una aportació mínima d'altura, donat que el desnivell entre l'aspiració i la impulsió eren mínims en el moment que es van prendre les mesures, tal i com es reflexa en el *annex 3* i a més l'eix de la bomba era paral·lel al terra, garantint un omplert total de les cambres entre filets.

Està clar que el problema que més influeix en el rendiment tan baix de la bomba és el motor instal·lat, ja que es tracta d'un motor asíncron de 15 kW de càrrega màxima, quan ni tan sols s'arriba a un quart d'aquest valor, quan la bomba funciona a la velocitat màxima. Com ja s'ha comentat en l'apartat 1.4.2.9, quan això passa, el motor té valors de rendiment  $\eta_m$  molt baixos, es posa de manifest el fet de que s'ha sobredimensionat aquest element per a les condicions a les que treballa la bomba. Mes endavant, es calcularà la potència elèctrica d'alimentació necessària del motor si la bomba treballés amb majors desnivells entre la captació i la impulsió, fent que es poguessin donar situacions amb un major requeriment de potència hidràulica.

- **Bomba cilíndrica de nivell variable**

En la següent taula resum és mostren les dades del cabal elevat pel cargol  $\overline{Q_c}$ , inclinació de la bomba respecte el pla horitzontal  $\beta$ , energia cedida a l'aigua  $H$ , la potència hidràulica desenvolupada  $P_H$ , el percentatge de càrrega aplicada al motor  $C$ , el rendiment del motor  $\eta_m$ , la potència elèctrica consumida pel motor  $P_{elec}$  i el rendiment global de la bomba  $\eta_g$ , tot en funció de la velocitat de gir de la bomba cilíndrica de nivell variable  $n$ .

$n(rpm)$	$\overline{Q_c} (m^3/s)$	$\beta(^{\circ})$	$H(m)$	$P_H(W)$	$C(\%)$	$\eta_m(\%)$	$P_{elec}(W)$	$\eta_g(\%)$
20	0,396	11,67	0,334	1.298,875	4,39%	20,00%	8.117,937	<b>16,00</b>
40	0,882	10,59	0,321	2.458,859	8,31%	36,00%	8.537,674	<b>28,80</b>

Taula 1. 6: resum de les dades adquirides de la bomba cilíndrica de nivell variable.

En aquest cas, el cabal descarregat per la bomba és un valor més alt que en el cas anterior, degut segurament al volum disponible entre filets com a conseqüència d'una relació de radis més petita i més pròxima als valors recomanats per les bombes cilíndriques fixes. Per tal de deixar constància d'aquest fet, es recorre a l'expressió analitzada en l'apartat 1.4.2 (Wijdieks, J. & Bos, M.G. 1972, p. 965-998), calculant el paràmetre  $k$  de la bomba cilíndrica de nivell variable. Aquest valor resultant, es compara el paràmetre  $k$  calculat per la bomba cilíndrica fixa, segons les dades de cabal mesurades per aquesta.

$$Q_n \left[ \frac{m^3}{s} \right] = k \cdot n \left[ \frac{rev}{s} \right] \cdot D^3 [m] \rightarrow k_{cil.nivell.variable} (n = 40rpm) = \frac{0,882}{0,67 \cdot 1,5^3} = \mathbf{0,39}$$

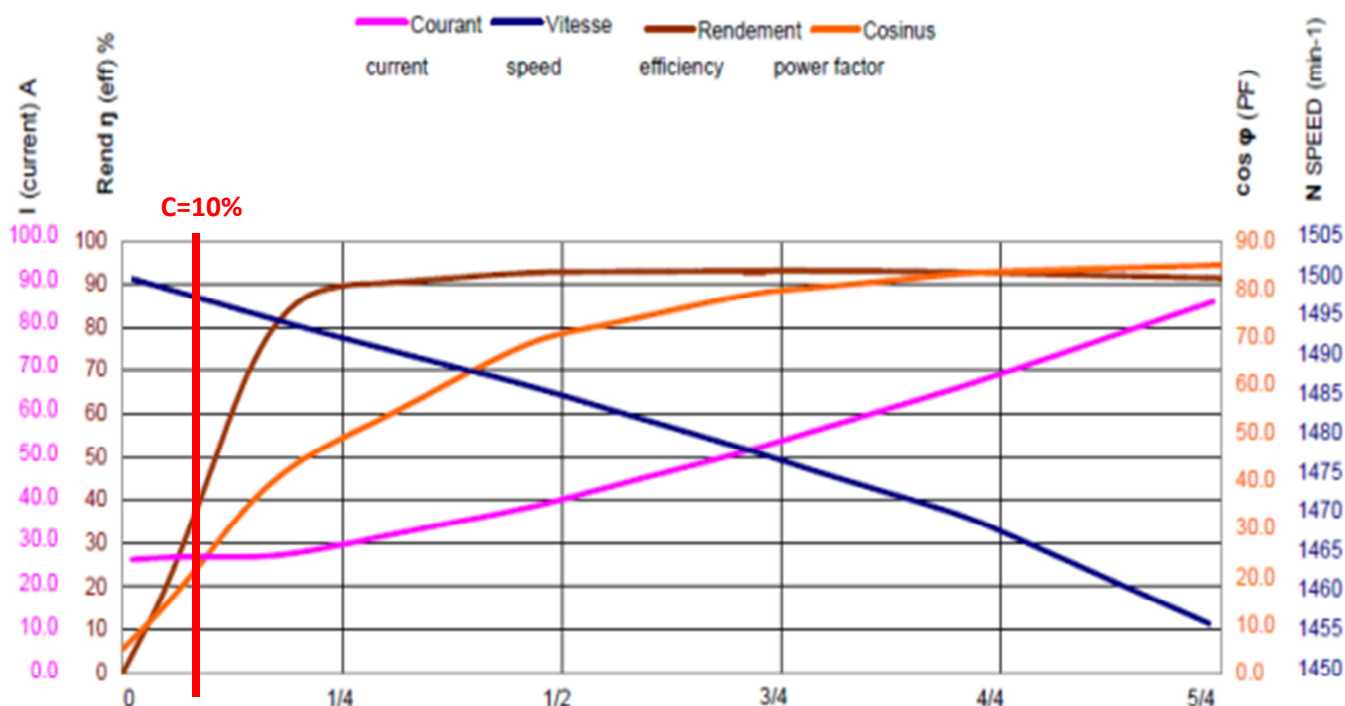
$$k_{cil.fixa} (n = 23rpm) = \frac{3,59}{0,38 \cdot 3^3} = \mathbf{0,35}$$

Com es pot comprovar, són resultats bastant semblants, no obstant, el valor d'aquest paràmetre depèn de factors com el rati de radis, el rati de pas i la inclinació del cargol. Aquest últim és el que més marca la diferència entre aquests dos models, ja que la bomba cilíndrica fixa tenia una inclinació de  $30^{\circ}$  i la bomba de nivell variable presentava inclinacions que oscil·laven entre  $10$  i  $11^{\circ}$ . En la publicació comentada en l'apartat d'antecedents (Wijdieks, J. & Bos, M.G. 1972, p. 965-998), es presenten taules amb diferents valors de  $k$ , no obstant, els



valors més alts d'aquest paràmetre es donen per a les bombes cilíndriques fixes amb menor inclinació i, per tant, és possiblement el fet que origina que el valor de  $k$  de la bomba cilíndrica de nivell variable sigui lleugerament superior.

Així, la bomba cilíndrica de nivell variable, té poca pendent en cadascun dels règims de funcionament analitzats, molt semblant al cas de la bomba cònica la qual estava treballant amb el seu eix paral·lel al pla horitzontal. Aquest fet, té influència sobre el cabal elevat, ja que el volum contingut entre els filets serà major, no obstant, l'energia potencial cedida al fluid es inferior i per tant també ho és l'energia total. Això últim és pot contrastar en la columna de  $H$ , on d'igual forma que per a la bomba cònica, l'energia total cedida al fluid és molt baixa, repercutint en la càrrega sol·licitada al motor  $C$  i per tant en el rendiment d'aquest, tal i com es pot observar en la columna destinada a aquesta dada. El fet de tenir un rendiment del motor baix és contraproductiu pel consum de potència elèctrica, fet que origina rendiments globals molt baixos tal i com es mostra en la columna  $\eta_g$ . En el cas del motor d'aquesta bomba, es disposa de la gràfica de rendiment del motor, la qual cosa, permet que s'hi pugui situar el requeriment de potència mecànica i a la vegada, trobar en quina part de la corba de rendiment s'estaria treballant.



Imatge 1. 48: zona de la corba de rendiment del motor en la que esta treballant la bomba cilíndrica de nivell variable.

En el gràfic anterior, es pot veure com el motor està funcionant amb un rendiment per sota del 40% en totes les situacions, la qual cosa torna a posar de manifest que el motor també està sobredimensionat en aquest cas, d'igual forma que amb la bomba anterior.

- **Bomba cilíndrica fixa**

En aquest cas, en la taula resum és mostren les dades del cabal elevat pel cargol  $\overline{Q_c}$ , energia cedida pel conjunt de la instal·lació de bombament a l'aigua  $H_{instal\cdot lació}$  (des de la zona d'entrada a la bomba cilíndrica fixa fins a la sortida de la comporta de clapeta, la qual es troba al final de l'estació de bombament de la sèquia de l'Ala), energia cedida per la bomba a l'aigua  $H_{bomba}$ , la potència hidràulica desenvolupada pel conjunt de la instal·lació de bombament  $P_{H_{instal\cdot lació}}$ , la potència hidràulica desenvolupada per la bomba  $P_{H_{bomba}}$ , el rendiment global de la instal·lació de bombament  $\eta_{g_{instal\cdot lació}}$  i el rendiment global de la bomba  $\eta_{g_{bomba}}$ , en aquest cas per a una única dada de velocitat de gir del cargol:

$n$ (rpm)	$\overline{Q_c}$ ( $m^3/s$ )	$H_{instal\cdot lació}$ (m)	$H_{bomba}$ (m)	$P_{H_{instal\cdot lació}}$ (W)	$P_{H_{bomba}}$ (W)	$P_{elec}$ (W)	$\eta_{g_{instal\cdot lació}}$ (%)	$\eta_{g_{bomba}}$ (%)
23	3,590	0,030	1,935	1.055,460	68.092,949	108.357,099	0,97	62,84

Taula 1. 7: resum de les dades adquirides de la bomba cilíndrica fixa.

Havent vist les dades d'aquesta bomba, és pot afirmar que el cabal descarregat és un valor bastant pròxim a les dades tècniques facilitades pel projecte constructiu de la sèquia de l'Ala, encara que una mica inferior (dades tècniques en l'apartat 1.2.1.1 de la memòria). No obstant, el rendiment global varia molt quan es tracta la bomba de forma aïllada o si pel contrari s'inclou en el conjunt de la instal·lació de bombament, degut a que la bomba està elevat l'aigua a una cota de 1,55 m per sobre del nivell de l'entrada i en canvi a la sortida de la instal·lació només és presenta un desnivell d'altura d'aigua entre l'entrada i la sortida de 0,03 m. Evidentment, això significa que l'energia potencial que li cedeix la bomba a l'aigua és dissipa quan aquesta es deixa caure abans de passar per la comporta de clapeta, a la sortida de la instal·lació. Així doncs, en aquesta cas la bomba està funcionant amb un rendiment bastant acceptable, no obstant, el conjunt de la instal·lació no ho està fent, ja que està malgastant energia elevat l'aigua a una altura molt major de la que és necessari.

#### 1.5.4.2.- Índex energètic

Per poder comparar les tres bombes per unes condicions similars s'ha calculat l'índex energètic mig de cadascuna d'elles i el de la instal·lació de bombament de la Sèquia de l'Ala, basant-se en les dades vistes anteriorment.

$$Index\ energètic = \frac{P_{elect}}{Q \cdot \Delta h} \left[ \frac{kW \cdot s}{l \cdot m} \right]$$

Eq 1. 21

El ratis obtinguts per cadascuna de les bombes i l'estació de bombament en funció del cabal i el desnivell han estat els següents:

	Índex energètic $\left[ \frac{kW \cdot s}{l \cdot m} \right]$
<b>Bomba cònica</b>	0,042
<b>Bomba cilíndrica de nivell variable</b>	0,063
<b>Bomba cilíndrica fixa</b>	0,019
<b>Instal·lació de bombament de la sèquia de l'Ala</b>	1,006

Taula 1. 8: índex energètic per cada tipus de bomba.

En la taula anterior es pot observar com la bomba que menys consumeix per cada litre d'aigua elevat és la cilíndrica fixa. Encara que no es pot assegurar que la bomba cilíndrica fixa sigui la més eficient, ja que no es normal que la bomba cilíndrica de nivell variable podent regular el nivell de la descàrrega i amb un disseny dels filets idèntic, tingui un rendiment tant baix, ja que com a mínim hauria de ser semblant. Com ja s'ha vist en les dades del rendiment global de les bombes anteriorment exposades, el problema principals de ambdues bombes, tant la bomba cilíndrica de nivell variable com la bomba cònica, és el dimensionament el motor elèctric, la qual cosa origina aquest índexs energètics més alts. En el cas de la bomba cilíndrica de nivell variable l'índex energètic hauria d'estar al voltant de la bomba cilíndrica fixa i per tant, el motor hauria d'estar dimensionat en consonància. D'altra banda, la bomba cònica també suposa una major despesa energètica per litre d'aigua

bombejat, encara que en aquest cas a falta d'un referent, es complicat a priori saber si la bomba està treballant correctament. No obstant les dades del rendiment global presentades per la bomba cònica són baixes, la qual cosa fa pensar que hi ha un problema similar al de la bomba cilíndrica de nivell variable.

D'altra banda, la taula 1.8 també posa de manifest un problema greu en quan al consum energètic de l'estació de bombament de la Sèquia de l'Ala, ja que no es coherent que per cada  $m^3$  elevat per la bomba s'estiguin gastant 1,006 kW·s/m. Tot fa pensar que es tracta d'un problema de dimensionament del conjunt de la instal·lació, ja que no cal elevar l'aigua a la cota que ho fa la bomba cilíndrica fixa, quan el desnivell requerit es tan petit. Evidentment, no sempre es donaran aquests desnivells, però no es lògic que hi hagi tanta diferència.

### 1.5.5.- Modelització

#### 1.5.5.1.- Comprovació d'una bomba cilíndrica totalment encapsulada

Per tal de comprovar l'afirmació realitzada a l'apartat 1.2.2.8 d'aquest document, s'ha construït una maqueta similar a la bomba cilíndrica de nivell variable, mitjançant un cargol sens fi de 100 mm de diàmetre exterior, 28 mm d'eix i un tub de metacrilat de 104 mm de diàmetre interior, tot ficant una tira d'escuma elastòmera entre el cargol i el tub de metacrilat per tal de millorar l'estanqueïtat i evitar excessives fuites d'aigua durant la prova.



Imatge 1. 49: maqueta construïda per a fer proves d'omplert i descàrrega.

Els resultats de la prova indicaven que encara que hi hagués un encapsulament total del cargol, es seguia produint el mateix efecte que en una bomba cilíndrica sense la part superior del cilindre exterior, es a dir, en el cas de sobrepassar l'altura d'aigua a l'entrada del cargol anteriorment descrita en l'apartat 1.2.2.8, l'aigua saltava d'una cambra a l'altra evitant que el nivell de l'aigua pugues ser superior. D'altra banda, es va arribar a la conclusió de que la relació entre radis té un paper molt important en aquest fet, ja que una relació petita, permet

un augment del volum unitari contingut per sota de l'eix, però per contra implica una menor altura  $l$  de màxim omplert per cambra, la qual cosa guarda relació amb el que s'indica en el manual pel disseny de bombes de cargol (Nagel, G. 1968), on indiquen que aquesta relació s'ha de mantenir pròxima a 0,5, ja que del contrari s'estaria afavorint una cosa, però empitjorant un altra.

#### 1.5.5.2.- Anàlisi del comportament hidràulic teòric de les bombes

En aquest apartat s'analitzen alguns paràmetres de les bombes estudiades que han estat comentats en els últims apartats, juntament amb càlcul del cabal teòric que haurien de donar les bombes vers el comportament real que s'ha pogut observar mitjançant les mesures in situ que s'han comentat en l'apartat 1.2.4.

##### 1.2.5.9.1.- Bomba cilíndrica fixa

En primer lloc, es presenta un quadre resum de les dades d'aquest model que s'han analitzat prèviament.

Dades de partida conegudes	
Cabal nominal segons projecte (l/s)	3.750
Velocitat nominal (rpm)	23
Potència elèctrica instal·lada (CV)	150
Potència nominal motor (CV)	104
Diàmetre exterior (mm)	3.200
Diàmetre interior (mm)	1.620
Pas del filet (mm)	3.200
Longitud de l'eix (mm)	5.680
Inclinació ( $^{\circ}$ )	30
Número de començaments	3
Màxima altura de descàrrega (mm)	1.550
Folgança entre els filets i el cilindre exterior (mm)	7

Taula 1. 9: dades de partida de la bomba cilíndrica fixa.

- Relació de pas amb el diàmetre exterior

$$\sigma = \frac{S}{D} = \frac{3.200}{3.200} = 1[\text{adim.}]$$

Eq 1. 22

Si s'analitza aquesta relació, tal i com s'indica en la memòria d'aquest document, per una inclinació de  $30^{\circ}$  la relació de pas és 1.

- Relació de radis

$$\delta = \frac{d}{D} = \frac{1.620}{3.200} = \mathbf{0,51} \text{ [adim.]}$$

Eq 1. 23

La relació de radis es troba dins del marge que s'indica en l'apartat 1.2.5.3, és a dir,  $0,45 < \delta < 0,55$  i per tant, es troba dins dels marges que es recomanen pel dimensionament dels eixos dels cargols.

- Velocitat de gir

D'altra banda, és important comprovar si la velocitat nominat del cargol està dins dels límits recomanats.

$$0,4 \cdot \frac{50}{\sqrt[3]{D^2}} = 0,4 \cdot \frac{50}{\sqrt[3]{3,2^2}} = 23 \frac{rev}{min} \leq n \leq \frac{50}{\sqrt[3]{D^2}} = \frac{50}{\sqrt[3]{3,2^2}} = 57,5 \frac{rev}{min}$$

Eq 1. 24

En aquest cas,  $n = 23 \frac{rev}{min}$  per tant, es evident, que la velocitat està dins dels límits.

- Cabal nominal teòric

El següent pas és el de trobar el volum unitari d'aigua teòric entre filets. Per tal de trobar aquesta dada, tal i com s'ha indicat en la memòria, s'utilitza el mètode gràfic (*veure annex 5*). En aquest cas, el volum unitari resultant d'aplicar aquest mètode ha estat:

$$V_u = 2,5892 \text{ m}^3$$

Això implica que el volum per cicle serà,

$$V_c = a \cdot V_u = 2,5892 \cdot 3 = 7,7676 \text{ m}^3$$

Eq 1. 25

Mitjançant aquesta última dada, es possible determinar el cabal,

$$Q_n = \frac{V_c \cdot n}{60} 1,15 = \frac{7,7676 \cdot 23}{60} 1,15 = \mathbf{3,4242} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Eq 1. 26

- Folgança entre el cilindre exterior i els filets

Tal i com s'ha especificat en la memòria, és important el fet de no sobrepassar un folgança màxima entre els filets i el cilindre exterior, donat que mentre la folgança sigui inferior, les pèrdues per fuites estaran compreses entre un 3% i un 12% del cabal nominal. En aquest cas, el valor màxim de folgança es:

$$S_{SPmax} = 0,0045 \cdot \sqrt{D} = 0,0045 \cdot \sqrt{3,2} = 0,008 \text{ m}$$

Eq 1. 27

Així doncs, es evident que  $S_{SP} = 7 \text{ mm} < S_{SPmax} = 8 \text{ mm}$  i per tant, es probable que les fuites de cabal estiguin compreses entre els intervals definits anteriorment.

- Fuites teòriques de cabal

L'expressió que s'utilitza per a realitzar aquest càlcul ha estat definida en l'apartat 1.2.5.2 de la memòria:

$$Q_1 = 2,5 \cdot S_{sp} \cdot D \cdot \sqrt{D} = 2,5 \cdot 0,007 \cdot 3,2 \cdot \sqrt{3,2} = 0,1001 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Eq 1. 28

El cabal que la bomba descarregarà serà:

$$Q_n - Q_1 = 3,3241 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Eq 1. 29

Es defineix per tant, el rendiment volumètric teòric d'aquesta bomba com:

$$\eta_v = \frac{Q_n - Q_1}{Q_n} \cdot 100 = \frac{3,4242 - 0,1001}{3,4242} \cdot 100 = 97,077 \text{ [%]}$$

Eq 1. 30

- Comparativa de les dades teòriques de cabal amb les dades reals mesurades in situ.

*El resultat de cabal teòric obtingut és molt similar al que s'ha pogut mesurar in situ, tal i com es pot comprovar en l'apartat 1.2.4.4, essent superior el cabal real. No obstant, la falta de més dades degut a que només existeix un punt de funcionament de la bomba, no*

permet fer un estudi més detallat del comportament real de la bomba respecte al teòric. D'altra banda, tots els paràmetres interiors de la bomba tenen valors que es troben dins dels marges recomanats segons el manual pel disseny de bombes de cargol (Nagel, G. 1968), la qual cosa permet un ús de l'expressió que es fa servir en aquest llibre per a trobar les possibles pèrdues de cabal en l'ascensió del fluid, encara que no deixa de ser una aproximació i per tant, donat que les mesures de cabal real de la bomba es van fer en el canal d'entrada a aquesta, però no en la sortida no hi ha cap valor real de pèrdues de cabal.

#### 1.2.5.9.2.- Bomba cilíndrica de nivell variable

Tal i com s'ha fet per la bomba anterior, es mostra una taula resum, on es pot veure les característiques principals d'aquesta bomba:

Dades de partida conegudes			
Velocitat nominal (rpm)	Marxa 1	Marxa 2	Marxa 3
	20	26	40
Potència elèctrica instal·lada (CV)	55		
Potència nominal motor (CV)	50		
Diàmetre exterior (mm)	1.500		
Diàmetre interior (mm)	750		
Pas del filet (mm)	1.500		
Longitud de l'eix (mm)	4.500		
Inclinació (°)	Depèn del nivell de sortida		
Número de començaments	3		
Màxima inclinació possible (°)	26,5		
Folgança entre els filets i el cilindre exterior (mm)	5		

Taula 1. 10: dades de partida de la bomba de cargol cilíndrica de nivell variable.

- Relació de pas amb el diàmetre exterior

$$\sigma = \frac{S}{D} = \frac{1.500}{1.500} = 1[\text{adim.}]$$

Eq 1. 31

- Relació de radis

$$\delta = \frac{d}{D} = \frac{750}{1.500} = 0,50 [\text{adim.}]$$

Eq 1. 32